

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”  
імені Ігоря Сікорського

О.П. Гребінь, Н.Ф. Левенець

## **ПРИКЛАДНА АКУСТИКА - 2. АРХІТЕКТУРНА АКУСТИКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка», спеціалізацій  
„Електронні та інформаційні системи і технології телебачення, кінематографії та  
звукотехніки", "Електронні та інформаційні технології кінематографії та  
аудіовізуальних систем", "Електронні засоби Інтернету речей та систем  
відеоспостереження"

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Рецензенти: *Луньова С.А., к.ф-м.н., доцент*

Відповідальний

редактор

*Лазебний В.Б., к.т.н., доцент*

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 01.04.2019 р.)  
за поданням Вченої ради факультету (протокол № 02/2019 від 25.02.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Гребінь Олександр Павлович

Левенець Нінель Федорівна

# ПРИКЛАДНА АКУСТИКА - 2. АРХІТЕКТУРНА АКУСТИКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**Прикладна акустика - 2. Архітектурна акустика.** Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка", спеціалізацій „Електронні та інформаційні системи і технології телебачення, кінематографії та звукотехніки", "Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем", "Електронні засоби Інтернету речей та систем відеоспостереження" / О.П. Гребінь, Н.Ф. Левенець ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 34 Мбайт (.doc); 3 Мбайт (.pdf)). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 101 с.

Навчально-методичне видання містить методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дослідження акустичних характеристик приміщень і надає змогу студентам отримати знання та практичні навички вимірювання акустичних характеристик приміщень. В навчальному посібнику наведені загальні теоретичні положення стосовно акустичних характеристик приміщення, зазначені методи вимірювання основних акустичних характеристик приміщень та наведено безпосередньо опис лабораторних робіт з дослідження акустичних характеристик приміщення.

Для кожної роботи наведено опис роботи з зазначенням вимірювальних пристроїв і обладнання, структура підключення та застосування вимірювального обладнання у відповідних приміщеннях, послідовність виконання роботи. В кожній роботі наведені вимоги до звіту та склад звіту про виконання роботи, а також перелік питань для самоперевірки й посилання на літературу, перелік якої наведений в кінці методичних вказівок.

© О.П. Гребінь, Н.Ф. Левенець, 2019

© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019

## ЗМІСТ

Вступ	4
Вимоги до оформлення результатів роботи	5
Перелік умовних позначень та скорочень	6
1 Звукове поле та акустичні характеристики приміщень	7
1.1 Аналіз звукового поля приміщення	7
1.2 Критерії оцінки акустичної якості приміщень	18
1.3 Звуковий фон в приміщенні	25
1.4 Забезпечення оптимальних акустичних умов у приміщеннях	28
2 Методи та особливості вимірювання основних акустичних характеристик приміщень	34
<b>Лабораторна робота №1.</b> Вимірювання часу реверберації приміщень із застосуванням спеціалізованого вимірювача РААЗ	49
<b>Лабораторна робота №2.</b> Вимірювання часу реверберації приміщення із застосуванням комп'ютерних технологій	53
<b>Лабораторна робота №3.</b> Дослідження акустичного облаштування навчальної лабораторії та акустичної камери й розрахунок часу реверберації приміщень	57
<b>Лабораторна робота №4.</b> Дослідження звукоізоляції огорожень приміщення	66
<b>Лабораторна робота № 5.</b> Дослідження звукоізоляційних властивостей огорожень навчальної лабораторії та акустичної камери й розрахунок рівня шумів, що проникає у приміщення з навколишніх просторів	72
<b>Лабораторна робота № 6.</b> Дослідження коефіцієнта звукопоглинання звукопоглинальних матеріалів	78
Перелік літератури	82
Додаток А Технічні параметри мікрофонів	84
Додаток Б Технічні параметри гучномовців	86
Додаток В Коефіцієнти звукопоглинання	88
Додаток Г Рівні звукових сигналів	96
Додаток Д Звукоізоляція огорожень	97

## ВСТУП

Лабораторні роботи з дисципліни „**Прикладна акустика - 2. Архітектурна акустика**” передбачають практичне ознайомлення студентів з акустичними умовами різноманітних приміщень, параметрами акустичних сигналів, що розповсюджуються у приміщеннях та відкритому просторі, а також методами та засобами вимірювання акустичних параметрів приміщень.

Лабораторні роботи, що описані в методичних вказівках передбачають вимірювання акустичних параметрів навчальних приміщень, зокрема навчальних лабораторій, навчальних студій, навчальної акустичної камери тощо, що знаходяться на кафедрі ЗТ та РІ ФЕЛ.

В процесі виконання лабораторних робіт окремі вимірювання акустичних параметрів, параметрів звукопоглинальних властивостей матеріалів, звукоізоляції окремих огорожень приміщень здійснюється в навчальній лабораторії, а також в акустичній камері, в якій створене умовне вільне акустичне поле. Однак через недосконалість архітектурних умов приміщень з точки зору акустичних параметрів, а також малі розміри акустичної камери, в якій присутні власні резонансні частоти, що дещо спотворює реальні параметри перетворювачів, виміряні параметри не завжди співпадають з передбачуваними. Тому в межах лабораторних робіт виконується теоретичний розрахунок акустичних параметрів навчальних приміщень, а результати порівнюються з виміряними. Також в процесі вимірювання необхідно враховувати акустичні умови камери і дещо апроксимувати результати вимірювань.

Студенти виконують лабораторні роботи на лабораторних макетах, які розроблено на кафедрі ЗТ та РІ і у приміщеннях кафедри. Структурні схеми пристроїв та схеми під'єднання контрольно-вимірювальних приладів наведено в кожній роботі.

Нумерація лабораторних робіт наскрізна. В кінці кожної роботи наведені посилання на літературу, перелік якої наведений в кінці методичних вказівок.

У процесі підготовки до лабораторної роботи необхідно вивчити теоретичний матеріал і вміти дати відповіді на контрольні запитання, наведені в завданні на лабораторну роботу.

Передбачено, що перед початком виконання лабораторних робіт обладнання та вимірювальні прилади лабораторних стендів з'єднано відповідно до вимірювальних схем для кожної лабораторної роботи. **Додаткового втручання студента в схему підключення обладнання не передбачено. Вмикання живлення, зміну з'єднань обладнання лабораторних стендів та технічний нагляд за робочим станом стендів забезпечує інженер учбово-допоміжного персоналу або викладач.** Студенти оперують лише органами керування апаратури і вимірювальних приладів, що знаходяться на лицьовій панелі приладів та комутаційних пристроїв стендів.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Специфіка проведення лабораторних робіт із дослідження акустичних параметрів приміщень та техніка безпеки вимагає присутності на робочому місці під час виконання кожної лабораторної роботи не менше чотирьох, а окремих робіт - десяти студентів. Студенти виконують лабораторні роботи тільки під керівництвом викладача.

Лабораторні роботи проводяться в два етапи: перший – підготовчий, полягає в попередньому опрацюванні чинних методичних вказівок, а також джерел, вказаних в переліку літератури. На цьому етапі необхідно вивчити технічні показники застосовуваних приладів та пристроїв, інструкції щодо роботи з приладами і апаратурою, намалювати структурні схеми відповідних вимірювальних стендів, вказаних в лабораторних роботах, підготувати бланки звітів з графіками і таблицями для подальшого заповнення в процесі виконання роботи.

На другому етапі – власне етапі виконання лабораторної роботи – на початку, передбачено перевірку студентами схем з'єднання вимірювальних приладів з досліджуванним об'єктом і уточнення принципів спільної роботи приладів і апаратів, а потім, – здійснення експериментальних досліджень і проведення порівняльного аналізу отриманих результатів (шляхом, наприклад, порівняння з теоретичними положеннями, причому перевірка може проводитися як кількісно, так і якісно).

Звіт з лабораторної роботи повинен містити таку інформацію:

- назву лабораторної роботи;
- дату виконання роботи;
- прізвище і ініціали студента;
- шифр групи;
- мету лабораторної роботи;
- структурну схему вимірювання акустичних параметрів із зазначенням точок спостереження сигналів;
- таблиці результатів вимірювань і обчислень, а також рисунки сигналограм, скріншоти й фотографії показань спеціалізованих приладів;
- висновки за наслідками роботи.

Звіт з лабораторної роботи має бути оформлено відповідно до вимог стандартів на технічну документацію. **Звіт з лабораторної роботи виконується кожним студентом індивідуально.** Звіт має бути складений акуратно й грамотно та підписаний виконавцем. Після закінчення роботи, оформлений відповідним чином звіт необхідно надати викладачу. *Це можна зробити на поточному занятті або на початку наступної лабораторної роботи. Студенти, що не здали звіт про попередню лабораторну роботу, до виконання наступної роботи не допускаються.*

З метою своєчасної підготовки до робіт і їх своєчасного виконання, на першому занятті викладач інформує студентів про конкретний графік виконання робіт (побригадно) на весь семестр.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ**

АК – акустична камера;  
АХ – амплітудна характеристика;  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;  
ВЗТ – вимірювач звукового тиску;  
ВЧ, НЧ, СЧ – верхні, нижні, середні частоти;  
ГЗЧ – генератор звукової частоти;  
ГМ – гучномовець  
ГНЧ – генератор низької частоти;  
ГТС – генератор тестових сигналів;  
ЕАА – електроакустична апаратура;  
ЕАП – електроакустичний перетворювач;  
ЕВ - електронний вольтметр;  
ЕО - електронний осцилограф;  
ЗК – звукова колонка;  
ЗМ – звуковий монітор;  
ЗП – звукопоглинання;  
ЗПМ – звукопоглинальний матеріал;  
ЛК, ПК (L, R) – лівий, правий канал;  
М – мікрофон;  
МП – мікшерний пульт;  
ПЗ – програмне забезпечення;  
ПК – персональний комп'ютер;  
ТЛФ – головні стереотелефони (стереонавушники);  
ФВЧ – фільтр верхніх частот;  
ЧР – час реверберації.

# 1 ЗВУКОВЕ ПОЛЕ ТА АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМІЩЕНЬ

## 1.1 Аналіз звукового поля приміщення

Для оцінки звукового поля приміщення і, відповідно, визначення акустичних характеристик приміщення застосовуються, в першу чергу, хвильовий та статистичний методи.

Звукові хвилі у закритих приміщеннях, багаторазово відбиваючись від його поверхонь, утворюють складне поле коливального руху частинок повітря. Закони розподілення коливальної швидкості частинок повітря, рівня звукового тиску, напрямів розповсюдження акустичної енергії в закритих приміщеннях визначаються не тільки характеристиками джерела звуку, а й геометричними розмірами, формою приміщення, здатністю стін, підлоги і стелі поглинати акустичну енергію. З цієї причини звукові поля в закритому приміщенні і у вільному просторі істотно відрізняються. Наприклад, у вільному полі інтенсивність звуку є потік енергії за одиницю часу через одиницю поверхні у напрямі розповсюдження звукової хвилі. Для звукового поля в приміщенні, якщо поглинання звукової енергії неістотне, поняття інтенсивності в цьому своєму класичному визначенні втрачає сенс, бо в кожен момент часу одночасно існують потоки енергії, що розповсюджуються (внаслідок наявності відбиттів) у різних напрямках. Рівні звукового тиску можуть дуже сильно змінюватись від однієї точки поля до іншої [1].

Універсальною і зручною в даній ситуації енергетичною характеристикою звукового поля є щільність звукової енергії  $\varepsilon = I/c_{зв} = p^2_{зв}/\rho_0 c^2_{зв}$ . Вона залежить не тільки від акустичної потужності джерела звуку, але і від акустичних властивостей приміщення.

Разом з тим, будь-яке приміщення можна представити як замкнутий повітряний об'єм, який, будучи коливальною системою з розподіленими параметрами, істотно впливає на часову структуру сигналу джерела звуку, помітно змінюючи забарвлення звучання. Повітря, що заповнює приміщення, має певну пружність і масу, чинить опір звукової хвилі, що розповсюджується в ньому. Такі властивості приміщення можна розглянути з позиції *хвильової теорії*, згідно якої повітряний об'єм закритого приміщення розглядається як складна багаторезонансна коливальна система з розподіленими параметрами.

Така система має певний спектр власних частот з відповідними постійними загасання, що характеризують енергію і швидкість загасання кожного з власних коливань. При впливі сигналу джерела в повітряному об'ємі приміщення збуджуються власні коливання з частотами, близькими до частот спектральних складових сигналу.

Спектр збуджуваних коливань залежить не тільки від спектру сигналу, але і

від положення джерела в приміщенні. Після виключення джерела або в паузах сигналу кожне власне коливання загасає зі своєю швидкістю, утворюючи за сукупністю з іншими власними коливаннями інтерференційну картину поступово загасаючого відзвуку або реверберації.

З точки зору хвильової теорії приміщення *ревербераційний процес* - це власне загасаюче коливання повітряного об'єму з частотами залежними від розмірів і форми приміщення, тобто не багаторазове відбиття, що відповідає статичній теорії, а плавно завмираючий тон резонатора (об'єм приміщення) звільненого від зовнішніх впливів.

Звуковий поле в приміщенні є композицією стоячих хвиль, форма яких визначається власними функціями коливань.

Спектр власних частот досить просто розрахувати лише для приміщень простих геометричних форм. Наприклад, для приміщень у формі прямокутного паралелепіпеда (з ідеально жорсткими відбивними поверхнями) довжиною  $l$ , шириною  $b$  і висотою  $h$  власні частоти

$$F_n = \frac{c_{зв}}{2} \sqrt{\left(\frac{g}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{r}{h}\right)^2}$$

де  $g, q, r$  - цілі числа. Кожній трійці цих чисел відповідає одна з власних частот приміщення. Зауважимо, що значення  $g, q, r$  визначають число стоячих хвиль, що виникають в приміщенні в напрямках  $l, b$  і  $h$  [1].

Для аналізу акустичних характеристик приміщень, приміщення розділяють на приміщення умовно малих розмірів та приміщення умовно великих розмірів. Приміщення малих розмірів визначаються умовою  $\sqrt[3]{V} < \lambda$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі збуджуваного коливання, а приміщення великих розмірів, відповідно, умовою  $\sqrt[3]{V} > \lambda$ .

У приміщеннях малого об'єму, спектр власних частот має дискретну структуру (рис. 1.1, а), цифрами зверху тут показані частоти, що повторюються (точніше число раз, яке кожне з них повторюється). Внаслідок цього окремі складові спектра збуджуваного коливання посилюються (підкреслюються), що супроводжується спотворенням тембру звучання. Як видно з рис. 1.1, а, лише в області нижніх частот (для приміщень такого невеликого об'єму) можна говорити про дискретну структуру спектра власних частот. З підвищенням частоти цей спектр власних частот ущільнюється.

Розподіл власних частот характеризується щільністю спектру, яка визначає кількість власних частот, які приходяться на частотний інтервал  $\Delta f = 1$  Гц.

Для приміщень малого об'єму й на нижніх частотах щільність спектра власних частот мала, що свідчить про неоднорідність звукового тиску в них. Великі приміщення на високих частотах мають спектр, який має суцільний характер.

Щільність спектра власних частот є важливою характеристикою приміщення,



що дозволяє з достатньою точністю прогнозувати зміну спектра і тембру звуку джерела. Якщо щільність спектра власних частот вище трьох у частотному інтервалі шириною 1 Гц, то приміщення практично не вносить тембрального забарвлення звуку.

Останнє положення стало основою для розрахунку граничної частоти  $f_{\text{гр}}$ , нижче якої звукове поле в приміщенні можна характеризувати хвильовою теорією. На частотах вище граничної частоти  $f_{\text{гр}}$  просторова неоднорідність звукового поля в приміщенні, що обумовлена резонансними явищами повітряного середовища приміщення, згладжується. При цьому можна не враховувати хвильові ефекти і використовувати більш прості методи статистичної акустики.

Прийнято вважати, що статистичні методи розрахунку застосовні при виконанні умови  $\lambda = c/f \leq \sqrt[3]{V/3}$ . Враховуючи неспіврозмірність розмірів приміщень, більш точною умовою застосовності методів статистичної або геометричної акустики слід вважати виконання нерівності  $\lambda \leq l_{\text{min}}/3$  або  $f > 1000/l_{\text{min}}$ , де  $l_{\text{min}}$  - мінімальний лінійний розмір приміщення [2].

Щільність спектра власних частот  $\Delta n$  в наперед заданому частотному інтервалі від  $F$  до  $F + \Delta F$  для приміщень, у яких лінійні розміри приміщення великі в порівнянні з довжинами хвиль можна оцінити за наближеною формулою

$$\Delta n \approx \frac{4\pi VF_0^2 \Delta F}{c_{\text{зв}}^3}$$

де  $F_0$  - середня частота виділеного частотного інтервалу  $F + \Delta F$ ;  $c_{\text{зв}}$  - швидкість звуку.

Загальна кількість власних частот в інтервалі від 0 до  $F$  може бути знайдено з формули

$$n = \frac{4\pi}{3c_{\text{зв}}^3} VF^3 + \frac{\pi}{4c_{\text{зв}}^2} SF^2 + \frac{1}{8c_{\text{зв}}} F$$

де  $L = 4(l+b+h)$ ;  $S = 2(lb+lh+bh)$ ;  $V$  - об'єм приміщення,  $\text{м}^3$ .

Чим менше розміри приміщення, тим в більшому діапазоні частот будуть спостерігатися резонансні явища і, отже, збільшуватиметься нерівномірність звукового поля.

В області нижніх частот резонансні частоти розташовані на великих відстанях одна від одної, так що, коли частота збуджувального коливання не дорівнює жодній з резонансних частот, амплітуда тиску визначається лише заданими значеннями, а в разі резонансу буде значно збільшуватись - це створює дуже нерівномірне звукове поле.

Разом з цим, згідно хвильової теорії акустики приміщення слідує, що процесу затухання відзвуку властиві флуктуації, обумовлені інтерференційними явищами. Іншими словами, кожен елемент (відрізок) часової структури сигналу збуджує

поступово затухаючий відзвук.

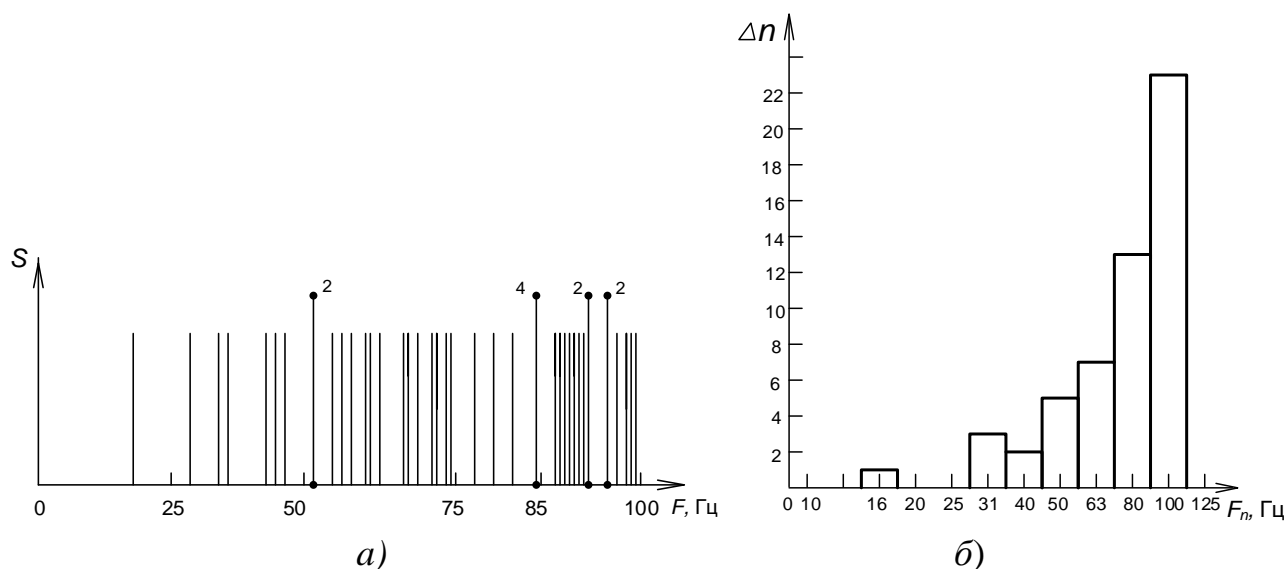


Рисунок 1.1 - Спектр власних частот (а), гістограма розподілу їх числа (б) для приміщення з розмірами  $l = 10$  м,  $b = 6$  м,  $h = 4$  м

Сукупність відзвуків утворює свого роду звуковий фон, який змінює часову структуру сигналу. Цей фон, будучи багатократним повторенням кожного відрізка сигналу, збільшує час існування сигналу і характеризує власні акустичні умови приміщення. Обидва ці чинники - структура спектра власних частот і швидкість загасання відзвуку приміщення - по-різному впливають на слухове сприйняття і на вимірювані параметри, в разі проведення вимірювань.

При  $\sqrt[3]{V} > \lambda$  щільність спектра власних частот приміщення настільки висока, що частота збуджуваного коливання практично не відрізняється за величиною від частоти власного коливання. Тому підсилення окремих компонент спектра сигналу за рахунок резонансів повітряного об'єму приміщення не відбувається.

Зазвичай нерівномірність частотних характеристик приміщень об'ємом понад  $100 \text{ м}^3$  пояснюється не резонансними явищами на власних частотах, а взаємодією численних власних коливань, які через випадковість фазових співвідношень посилюються або послаблюються.

Якісний аналіз основних положень хвильової теорії дозволяє більш точно пояснити механізм формування поля в замкнутому об'ємі. Дійсно, приміщення можна представити у вигляді багаторезонансної фізичної системи, яка має складний характер частотної залежності коефіцієнта передачі звуку від джерела до приймача звуку.

Якщо джерело звуку тільки починає діяти, в приміщенні виникає складний коливальний процес, що складається з суми вимушених коливань, що мають частоти джерела звуку, і перехідних коливань, ефективно збуджуваних на власних частотах приміщення. Перехідний процес визначається сумою стоячих хвиль, що характеризуються модами і власними частотами.

Приміщення повинно передавати всі частоти однаково добре, перехідні

процеси не повинні істотно спотворювати звук. При виключенні джерела звуку стоячі хвилі відразу не зникають, їх енергія трансформується в енергію перехідних вільних коливань, що мають свої власні частоти. Загасання вільних коливань в приміщенні називають реверберацією.

У разі співпадання всіх складових частот джерела звуку з власними частотами приміщення в процесі реверберації буде зберігатися точна спектральна картина вихідного сигналу, тобто сигнал буде зберігати свої властивості в процесі загасання звуку. В реальній ситуації в приміщенні відбувається зміна спектра звукового сигналу-джерела, що виявляється в зміні частотних інтервалів і амплітудних співвідношень в спектрі сигнал-відзвук.

Кількісні значення змін частотних інтервалів протилежні збільшенню об'єму, тобто зазначений ефект зміни спектра сигналу характерний для малих об'ємів приміщень.

З точки зору *статистичної теорії* оцінки звукового поля приміщення звукове поле приміщення в кожній точці простору можна представити як сукупність хвиль, що приходять безпосередньо від джерела по найкоротшому шляху (прямий звук), і хвиль, що попадають в дану точку після одного або декількох відбиттів від поверхонь цього приміщення (відзвуки). Останні утворюють *ревербераційний процес* приміщення і відрізняються від прямого звуку рівнем, спектральним складом, часом і напрямом приходу. Напрями потоків потужності відбитих хвиль залежать від геометричної форми приміщення і ступеня поглинання акустичної енергії межами (поверхнями) приміщення. При зміні співвідношення між довжиною хвилі і розмірами приміщення, акустичних властивостей і форм відбивальних поверхонь характер звукового поля приміщення змінюється.

Таким чином, поле в кожній точці приміщення можна розглядати як результат накладення на сигнал прямої звукової хвилі, що поступає від гучномовця або виконавця по найкоротшому шляху (прямий звук), значного числа повторень, що запізнюються, обумовлених відбитими звуковими хвилями (відзвуками), що зазнали різне число відбиттів від поверхонь приміщення. Внаслідок поглинання звукової енергії при відбитті повторення, що запізнюються, мають менший рівень, ніж первинний сигнал. В середньому рівень цих повторень убуває із зростанням часу запізнювання, оскільки сигнали з більшою затримкою зазнають, як правило, і більше число відбиттів, отже, більше послабляються. Сукупність цих відбитих звуків утворює *ревербераційний процес* приміщення, що істотно змінює забарвлення звучання.

Найважливішою особливістю ревербераційного процесу в приміщенні є його просторовість – відзвуки приходять в точку спостереження з різних напрямів, що істотно поліпшує сприйняття всіх його часових і частотних змін завдяки властивій слуху розрізнявальній здатності по напрямку. Цю властивість слуху називають звичайно *просторовим демаскуванням*. Проте в дифузному звуковому

полі при стаціонарно працюючому джерелі звуку кількість звукової енергії, що поступає з різних напрямів, однакова. Все ж таки випадки, коли звукове поле в приміщенні є ідеально дифузним, зустрічаються досить рідко [1].

Типова картина ревербераційного процесу для приміщення будь-якої форми зображена на рис. 1.2, а. По осі ординат відкладені рівні сигналів прямого звуку і відзвуків, по осі абсцис – час їх надходження в точку прийому звуку.

У початковій стадії часова структура ревербераційного процесу дискретна. Із збільшенням часу запізнювання відбитих сигналів їх кількість зростає, а часові інтервали між ними зменшуються. В завершальній частині реверберації сигнали, що запізнюються, утворюють настільки щільну послідовність, що їх можна вважати такими, що зливаються один з одним. Рівень відзвуків з часом поступово зменшується. Даний процес має флуктуаційний характер. Ця початкова ділянка ревербераційного процесу несе інформацію про геометричні розміри приміщення, його об'єм, визначає таку важливу особливість сприйняття, як просторовість звучання, а також властиве приміщенню специфічне забарвлення звучання. завершальна ділянка ревербераційного процесу характеризується надходженням в кожен момент часу досить великого числа відбитих сигналів. Вона визначає властиву приміщенню гулкість звучання [1].

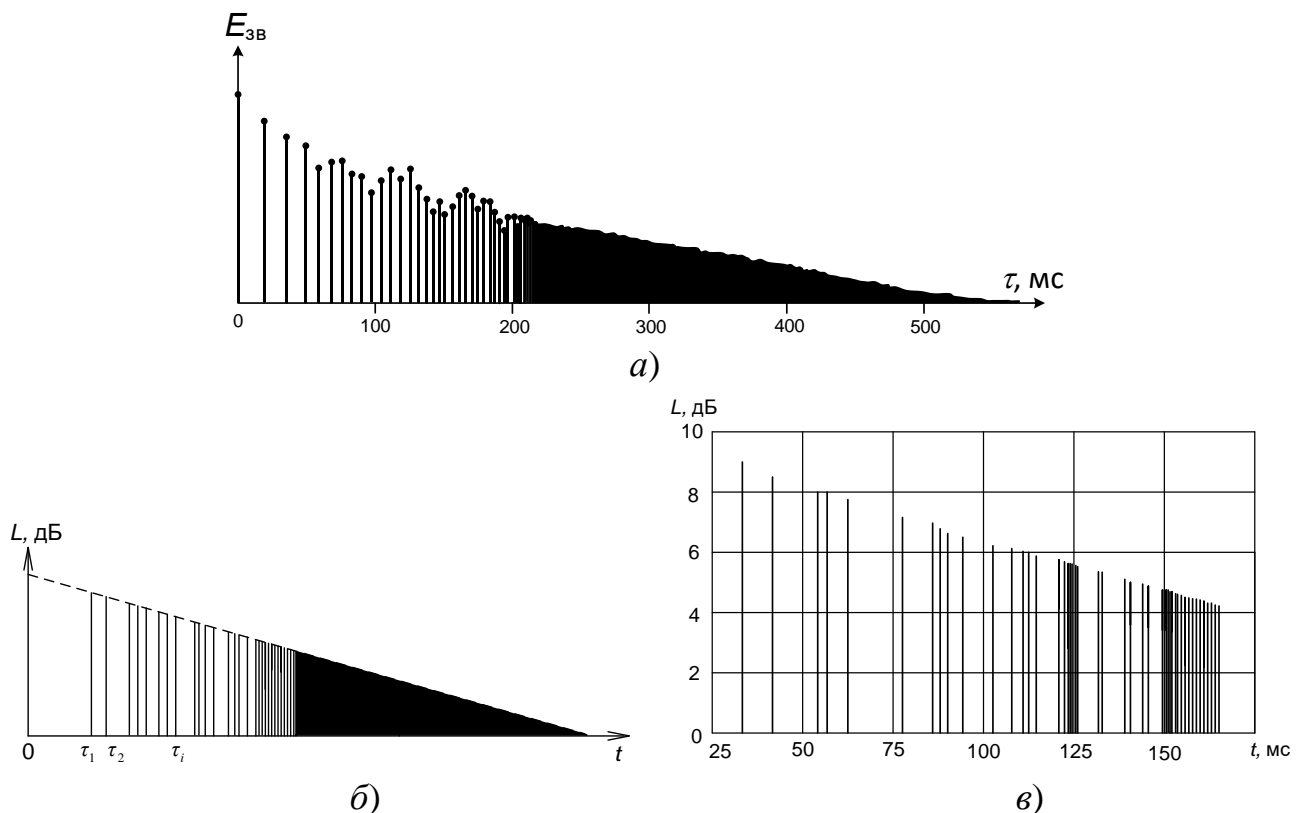


Рисунок 1.2 – Часова структура ревербераційного процесу в приміщенні (а), структури реверберуючого сигналу у логарифмічному масштабі (б) і початкова її ділянка (в) для приміщення у формі паралелепіпеда

Необхідно зазначити, що досить повного "перемішування" відбиттів можна чекати не раніше як через 100 мс, а у великих приміщеннях – і через 200 мс. Звукове поле в приміщенні наближається до дифузного не раніше вказаного

проміжку часу. І стосовно ревербераційного процесу можна говорити про динамічну дифузність звукового поля в приміщенні, що зростає до завершальної частини ревербераційного процесу. Лише після цього моменту може спостерігатися експоненціальний спад енергії поля реверберуючого звуку, що підкоряється статистичним законам.

Між сигналом прямого звуку і завершальною ділянкою ревербераційного процесу розташовуються ранні відбиття. Їх інтенсивність, напрями приходу до слухача, час запізнювання по відношенню до сигналу прямого звуку визначають погані і хороші місця у залі. Картина ранніх відбиттів індивідуальна для кожного слухачького місця. Відмітимо (за винятком крайніх випадків), що слухач концерту або опери сприймає лише від 5 до 20 % загальної енергії у вигляді прямого звуку, 10 % енергії доводиться на завершальну ділянку ревербераційного процесу. Інше, приблизно 70...80 %, – це енергія дискретних відбиттів [1]. Багато авторів стверджують, що початкова частина ревербераційного процесу набагато важливіше для суб'єктивного сприйняття, ніж завершальна його ділянка, коли процес формування структури поля вже завершився і починається спад енергії по експоненціальному закону.

У дискретній частині ревербераційного процесу слід розрізняти умовно ранні і пізні відбиття. Межа між ними лежить близько 50 мс для мови і 80 мс для музики. Численними експериментальними спостереженнями відмічена важлива роль перших (ранніх) дискретних відбиттів в створенні ефекту просторового сприйняття звучань мови і музики. При звучанні музики максимальний ефект просторовості і прозорості звучання досягається, якщо перше відбиття запізнюється по відношенню до сигналу прямого звуку приблизно на 20...30 мс, а перші три сигнали, що запізнюються, розміщуються в інтервалі 45...75 мс. При звучанні мови висока розбірливість досягається, якщо перший запізнений сигнал приходить не пізніше 10...15 мс після сигналу прямого звуку, а перші три відбиття – в інтервалі 25...35 мс. Збільшення часу запізнювання першого відбиття підсилює і тут ефект просторовості звучання, але при цьому, як правило, знижується розбірливість. Відсутність ділянки дискретних відбиттів приводить до відчутного погіршення якості звучання. Можна сказати, що найраніші відбиття підвищують розбірливість і прозорість, а пізніші – просторове враження. Перший сигнал, що запізнюється, як правило, приходить, відбившись від стелі. Відбиття від бічних стін, що приходять в інтервалі часу від 25 до 80 мс, можуть одночасно підвищувати як прозорість, так і просторове враження. Просторовість приходу ранніх відбиттів – дуже важлива особливість дискретної ділянки ревербераційного процесу в приміщенні [1].

Орієнтовна часова структура реверберуючого сигналу в приміщенні показана на рис. 1.2, б. Вона отримана в припущенні експоненціального загасання. У напівлогарифмічному масштабі ця залежність виражається прямою лінією. Початкова ділянка часової структури відбиттів, розрахована для прямокутного

приміщення розміром 40x25x8 м показана на рис. 1.2, в. Вона отримана в припущенні, що сигнали послаблюються при відбитті від стін і, крім того, внаслідок сферичності фронту хвилі інтенсивність хвилі змінюється обернено пропорційно квадрату відстані від джерела звуку до точки спостереження.

Якщо в початковій стадії процесу відзвуку (див. рис. 1.2, в) структура реверберуючого сигналу дискретна, то в його завершальній частині реверберації запізнілі сигнали утворюють настільки щільну послідовність, що їх можна вважати такими, що зливаються один з одним.

Ревербераційний процес приміщення, його тривалість та рівні відбитих сигналів залежить від звукопоглинальних властивостей поверхонь приміщення й матеріалів, що розташовані у приміщенні.

Звукопоглинання у приміщенні визначається коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha$ . Значення коефіцієнтів звукопоглинання  $\alpha$ , що приводиться в довідниках, набуто в дифузному звуковому полі, яке характеризується рівномірним розповсюдженням звукових хвиль в кожному напрямі, рівністю значень звукової енергії, що розповсюджується в кожному напрямі, однаковим значенням сумарної звукової енергії в кожній точці об'єму приміщення. В цьому випадку коефіцієнт звукопоглинання є середнім значенням сукупності всіх його можливих значень

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i(\varphi_i)$$

де  $\alpha_i(\varphi_i)$  – коефіцієнт звукопоглинання при куті падіння звукової хвилі  $\varphi_i$ .

Для більшості звукопоглинальних матеріалів та конструкцій коефіцієнт звукопоглинання залежить від частоти звукового сигналу.

Звукопоглинання у приміщенні визначається матеріалами, предметами, людьми тощо, що знаходяться у приміщенні, конструкцією та покриттям огорожень.

Поверхні перешкод порожнього приміщення, оброблені різними матеріалами з коефіцієнтами звукопоглинання  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  при площі поверхні кожного з них відповідно  $S_1, S_2, \dots, S_n$  утворюють загальний фонд звукопоглинання

$$A_{\text{заг}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n = \sum \alpha_n S_n$$

Тут  $S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_{\Sigma}$  – сумарна площа всіх поверхонь приміщення.

Додатковий фонд звукопоглинання приміщення утворюють люди, предмети обстановки (відносно яких важко оцінити займану ними площу). Якщо відомі загальне число одиниць звукопоглинання для кожного такого об'єкту ( $A_1, A_2, \dots, A_k$ ) і їх кількість в приміщенні  $L_1, L_2, \dots, L_k$  то додатковий фонд звукопоглинання дорівнює  $A_{\text{дод}} = \sum A_k L_k$ .

Окрім основного і додаткового фондів звукопоглинання необхідно враховувати ще і так званий доповняльний фонд звукопоглинання  $A_{\text{доп}} = \alpha_{\text{доп}} S_{\text{доп}}$ , де  $\alpha_{\text{доп}}$  – коефіцієнт доповняльного звукопоглинання, що враховує проникнення звукових хвиль в різні щілини і отвори приміщення, коливання різноманітних

гнучких елементів, поглинання звуку освітлювальною арматурою і т.п.

Загальне (сумарне, повне) звукопоглинання в приміщенні

$$A_{\Sigma} = \sum \alpha_n S_n + \sum A_k A_k + \alpha_{\text{доп}} S_{\text{доп}}$$

де  $A$ ,  $\alpha_n$ ,  $A_k$ ,  $\alpha_{\text{доп}} S_{\text{доп}}$  виражені в одиницях звукопоглинання. Під одиницею звукопоглинання розуміється поглинальна здатність  $1 \text{ м}^2$  умовного матеріалу, що має  $\alpha = 1$  ( $\beta = 0$ ), тобто повністю поглинає звукову енергію, що падає на цю поверхню.

Середнє значення коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha_{\text{ср}}$  для приміщення

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{A_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}$$

відповідає умовному матеріалу, яким можна було б обробити поверхні приміщення, забезпечивши поглинання звукової енергії, властиве даному конкретному приміщенню, поверхні якого оброблені різнорідними матеріалами. Іншими словами, середнє значення коефіцієнта звукопоглинання є величиною, що враховує різноманітність кутів падіння звукових хвиль на відбивну поверхню, відмінність поглинаючих властивостей матеріалів, якими оброблені поверхні приміщення, наявність в останньому звукопоглинальних предметів [1].

Основні акустичні характеристики приміщення можна розглядати через процеси наростання звукової енергії в приміщенні після включення джерела звуку і її поступового поглинання після виключення джерела.

Згідно статистичної теорії аналізу акустичних процесів в приміщеннях процес накопичення звукової енергії у приміщенні після включення джерела можна описати виразом [1]

$$E(t) = \frac{4P_a V}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}} \left[ 1 - \exp \left( \frac{c_{\text{зв}} S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}{4V} t \right) \right].$$

Враховуючи, що універсальною енергетичною характеристикою звукового поля в приміщенні є щільність звукової енергії, остаточно можна записати

$$\varepsilon(t) = \frac{E(t)}{V} = \frac{4P_a}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}} \left[ 1 - \exp \left( \frac{c_{\text{зв}} S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}{4V} t \right) \right].$$

Нагадаємо, що  $\alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma} = A_{\Sigma}$  – загальне поглинання звукової енергії в приміщенні. Коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha < 1$ , тому  $\ln(1 - \alpha) < 0$ , показник ступеня має негативний знак і при  $t \rightarrow \infty$  другий співмножник прагне до нуля. Тому в сталому режимі

$$\varepsilon_0 = \frac{4P_a}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}}.$$

Величина  $\varepsilon_0$  називається *сталюю щільністю звукової енергії* у приміщенні. У сталому режимі потужність, що поглинається поверхнями приміщення, дорівнює

потужності, що випромінюється джерелом звуку. Інакше кажучи, процес наростання звукової енергії в приміщенні відбувається до тих пір, поки енергія, яка відповідає повторенням (відзвукам), що найбільш запізнюються, не знизиться до значення, яким можна знехтувати.

З формули визначення  $E(t)$  витікає, що в дифузному звуковому полі процес наростання щільності звукової енергії в приміщенні відбувається по експоненціальному закону (теоретична залежність 1 на рис. 1.3,а). При цьому наростання звукової енергії прискорюється при збільшенні модуля показника ступеня при експоненті, тобто при збільшенні коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha$  і відношення  $S/V$ , залежного від форми і розмірів приміщення. Очевидно, що стала в приміщенні щільність звукової енергії  $\varepsilon_0$  росте із збільшенням потужності джерела звуку  $P_a$  і падає із збільшенням загального звукопоглинання  $A_\Sigma = \alpha_{cp} S_\Sigma$ . У реальних умовах звукове поле в приміщенні не може вважатися строго дифузним і процесу наростання звукової енергії в приміщенні властиві флуктуації, тобто відхилення від теоретичної залежності (залежність 2 на рис. 1.3,а).

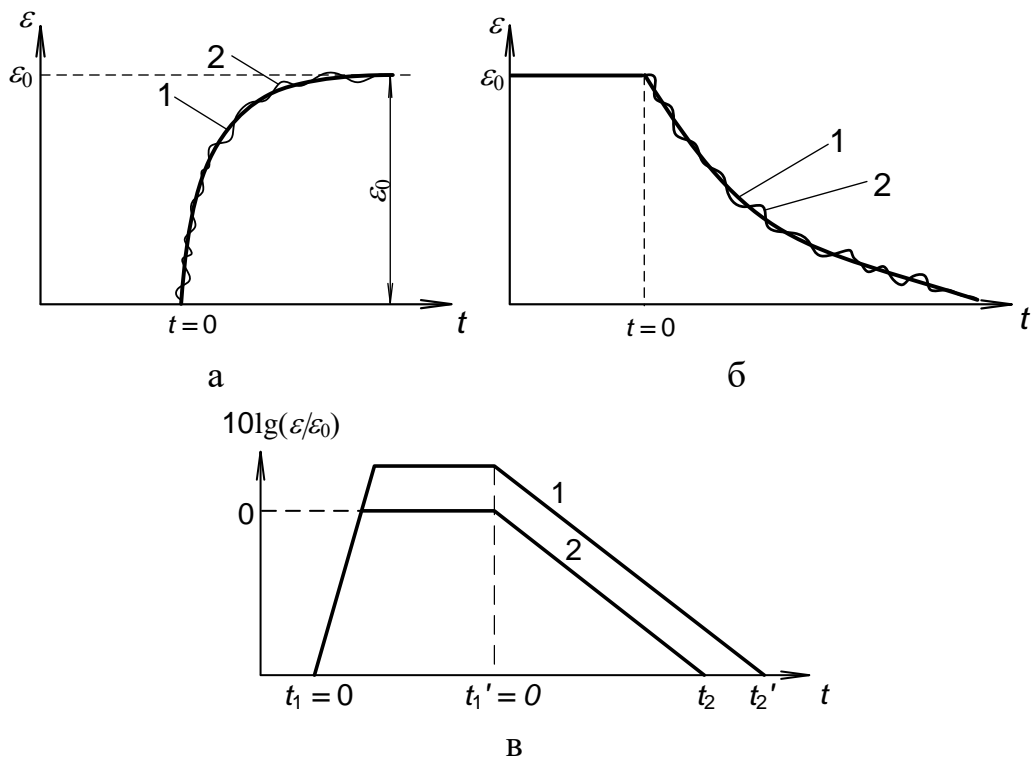


Рисунок 1.3 – Наростання (а) і спадання (б) щільності звукової енергії в приміщенні, а також поєднання цих процесів в одному часовому масштабі (в)

Якщо у приміщенні, в якому встановлена стала щільність звукової енергії  $\varepsilon_0$  відключити джерело звуку, то енергія у приміщенні почне спадати за рахунок поглинання її огороженнями приміщення. Процес спадання енергії може бути описаний виразом [1]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp \left[ \frac{c_{зв} S_\Sigma \ln(1 - \alpha_{cp})}{4V} t \right].$$



Процес спадання звукової енергії в приміщенні також відображається експоненціальною залежністю (1 на рис. 1.3,б) і залежить від загального звукопоглинання  $A_{\Sigma} = \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}$  і об'єму  $V$  приміщення. Цей процес тим коротше, чим більше  $A$  і чим менше  $V$ . Процес загасання звуку в реальних приміщеннях носить також флуктуаційний характер (2 на рис. 1.3,б).

На рис. 1.3, в зображені процеси наростання і спадання звукової енергії в приміщенні в одному часовому масштабі. Тут по осі ординат відкладений логарифм відносної зміни щільності звукової енергії  $\lg(\varepsilon/\varepsilon_0)$  як величини, що більш точно відображає реакцію слуху на звукову дію, а по осі абсцис відкладений поточний час  $t$ . З розгляду цієї залежності, де момент  $t_1$  відповідає включенню джерела звуку в приміщенні, а  $t'_1$  – його виключенню, видно, що процес наростання щільності звукової енергії в приміщенні відбувається дуже швидко і тому непомітний на слух. Процес спаду звукової енергії, званий реверберацією, протікає поволі, помітний на слух і грає важливу роль в слуховому сприйнятті.

Звукова енергія поглинається не тільки поверхнями перешкод приміщення, але і середовищем. Ці додаткові втрати обумовлені в'язкістю і теплопровідністю повітря, а також молекулярним поглинанням. Поглинання звуку в повітрі визначається пробігом звукової хвилі і достатньо точно може бути описано експоненціальною функцією вигляду

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp(-\mu l),$$

де  $l = c_{\text{зв}} t$ , а  $\mu$  - коефіцієнт загасання, що дорівнює зворотному значенню того шляху  $l$ , на якому щільність звукової енергії зменшується в  $e$  раз. Значення  $\mu$ , залежить від щільності  $\rho_0$  і в'язкості  $\eta$  повітря, а також від температури, вологості повітря і частоти сигналу  $f$ :

$$\mu = 52,5 \frac{f^2}{c_{\text{зв}} \rho_0} \eta.$$

З урахуванням поглинання звуку в повітрі вираз процес спадання щільності звукової енергії, що описує процес реверберації звуку в закритому приміщенні, можна представити у вигляді

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp(-\mu l) \exp\left[\frac{c_{\text{зв}} S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}{4V} t\right] = \varepsilon_0 \exp\left[\frac{S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{\text{ср}}) - 4\mu V}{4V} c_{\text{зв}} t\right].$$

Відмітимо, що при одній і тій же акустичній потужності джерела звуку тривалість процесу реверберації на низьких і середніх частотах майже не залежить від звукопоглинання повітряного середовища, бо значення коефіцієнта  $\mu$  мало. У області верхніх частот тривалість процесу реверберації зменшується тим значніше, чим вище частота. Взагалі кажучи, чим більший об'єм приміщення, тим більша середня довжина вільного пробігу звукової хвилі, тим на нижчих частотах починає позначатися поглинання звуку в повітряному середовищі [1].

## 1.2 Критерії оцінки акустичної якості приміщень

Серед критеріїв акустичної якості приміщень в першу чергу зазначають час реверберації у приміщенні.

### Стандартний час реверберації

Стала щільність звукової енергії в приміщенні залежить від акустичної потужності  $P_a$  джерела звуку. Очевидно, що із збільшенням  $P_a$  тривалість ( $t_2$  і  $t_1$  на рис. 1.3, в) процесу реверберації зростає, хоча його слухова оцінка практично залишається незмінною. Щоб час реверберації характеризував тільки акустичні властивості приміщення, треба виключити його залежність від  $P_a$ . Для цього введено поняття *стандартного часу реверберації*  $T_p$  приміщення – часу, протягом якого щільність звукової енергії  $\varepsilon(t)$  зменшується в  $10^6$  разів, тобто на 60 дБ (рис. 1.4, а). З цього визначення виходить, що при  $t = T_p$

$$\frac{\varepsilon(T_p)}{\varepsilon_0} = 10^{-6} = \exp \left[ \frac{S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}) - 4\mu V}{4V} c_{зв} T_p \right].$$

Після логарифмування і підстановки значень  $c_{зв} = 343$  м/с, що відповідає температурі повітря  $20^\circ\text{C}$ , і  $\lg e = 0,434$  вирішимо одержаний вираз відносно часу  $T_p$  [1]

$$\begin{aligned} \ln 10^{-6} &= \frac{S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}) - 4\mu V}{4V} c_{зв} T_p; \\ T_p &= \frac{\ln 10^{-6} \cdot 4V}{(S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}) - 4\mu V) c_{зв}} = \frac{\ln 10^{-6} 4V / c_{зв}}{S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}) - 4\mu V}. \\ T_p &= \frac{0,161V}{-S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4\mu V}. \end{aligned}$$

Отже, стандартний час реверберації  $T_p$  залежить від об'єму приміщення  $V$ , площі обмежуючих його поверхонь  $S_{\Sigma}$ , коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha$  і поглинання звуку в повітрі  $\mu$ . Відмітимо, що в знаменнику цієї формули перший доданок  $(-S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp}))$  враховує втрати звукової енергії при відбиттях, другий  $(4\mu V)$  – поглинання звуку в повітрі. Величини  $\alpha$  і  $\mu$  частотно-залежні. З підвищенням частоти стандартний час реверберації  $T_p$  зменшується перш за все внаслідок зростання  $\mu$ .

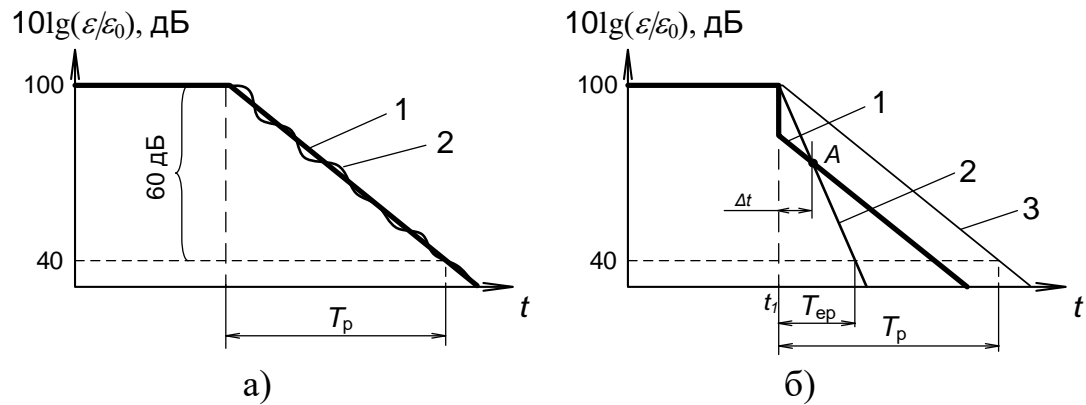


Рисунок 1.4 – Діаграми, що пояснюють оцінку часу стандартної (а) і еквівалентної (б) реверберації: 1 – теоретична залежність; 2 – реальна залежність

Для невеликих приміщень, а також для приміщень великого об'єму, але на частотах нижче 1000 Гц другим доданком в можна нехтувати і визначати час реверберації за формулою:

$$T_p \approx \frac{0,161V}{-S_{\Sigma} \ln(1 - \alpha_{cp})}.$$

У приміщеннях великого об'єму на частотах 1000...4000 Гц поглинання звуку матеріалами і конструкцією приміщення, тобто втрати звукової енергії при відбиттях і поглинання звуку у повітрі приблизно рівноцінне. На частотах більше 4000 Гц основну роль починає грати звукопоглинання в повітрі і стандартний час реверберації стає малим, і таким, що практично вже не впливає на слухове сприйняття.

Відмітимо, що  $-\ln(1-\alpha)=\alpha'$  називають ревербераційним коефіцієнтом поглинання. При невеликих значеннях коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha \leq 0,2$  справедливі співвідношення  $-\ln(1-\alpha)=\alpha$  і  $\alpha'S=\alpha S=A$ , а розрахунок часу реверберації можна виконувати за формулою Себіна

$$T_p = \frac{0,161V}{\alpha_{cp} S_{\Sigma}}.$$

Якщо звідси знайти звукопоглинання приміщення

$$A_{\Sigma} = \alpha_{cp} S_{\Sigma} = \frac{0,161V}{T_p}$$

і підставити цей вираз для сталої щільності звукової енергії  $\varepsilon_0 = \frac{4P_a}{c_{зв} \alpha_{cp} S_{\Sigma}}$ , то

одержимо, що при постійній акустичній потужності джерела звуку стала в приміщенні щільність звукової енергії  $\varepsilon_0$  зростатиме із збільшенням  $T_p$ :

$$\varepsilon_0 \approx \frac{P_a T_p}{13,8V}.$$

Жодна з приведених тут розрахункових формул не є абсолютно точною, оскільки не враховує впливу форми приміщення, особливостей розміщення

джерела звуку і звукопоглинальних матеріалів. Строго кажучи, ці формули придатні, якщо звукове поле в приміщенні є ідеально дифузним [1].

### ***Акустичне відношення і еквівалентна реверберація***

Стандартний час реверберації є важливим, але не вичерпним критерієм акустичної якості приміщення. Цей параметр характеризує акустичні властивості приміщення в цілому, тоді як слухова оцінка звучання на окремих місцях прослуховування може бути різною, що перш за все обумовлено зміною співвідношення щільності звукової енергії  $\varepsilon_{\text{пр}}$  прямого звуку і енергії  $\varepsilon_{\text{відб}}$ , що надходить в цю точку всією сукупністю відбиттів.

Якщо джерело звуку випромінює сферичні хвилі, то щільність звукової енергії прямого звуку в точці приміщення, віддаленій від нього на відстань  $r$  буде визначатись як:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{зв пр}}}{c_{\text{зв}}} = \frac{P_{\text{а}}}{4\pi r^2 c_{\text{зв}}}.$$

Щільність звукової енергії  $\varepsilon_{\text{відб}}$ , тобто дифузної складової, визначимо як частину сталої щільності звукової енергії  $\varepsilon_0$ , яка залишається в приміщенні після виключення джерела звуку через інтервал часу  $t_{\text{ср}}$  (тобто після першого відбиття від поверхонь приміщення):

$$\varepsilon_{\text{відб}} = \varepsilon_0 \beta_{\text{ср}} = \frac{4P_{\text{а}}}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}} (1 - \alpha_{\text{ср}}).$$

Величину, що характеризує співвідношення щільності звукової енергії прямого  $\varepsilon_{\text{пр}}$  і дифузного  $\varepsilon_{\text{відб}}$  звуків, називають *акустичним відношенням*:

$$R = \frac{\varepsilon_{\text{відб}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2}{S_{\Sigma}} \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}}}.$$

Величина  $R$  залежить від частоти, оскільки коефіцієнт  $\alpha$  частотно-залежний. Для джерела звуку з направленим випромінюванням величина акустичного відношення може бути розрахована по формулі

$$R' = \frac{\varepsilon_{\text{відб}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2}{S_{\Sigma} \Omega D^2(\varphi)} \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{ср}}}{\alpha_{\text{ср}}}.$$

де  $\alpha_{\text{ср}}$  – середній коефіцієнт звукопоглинання у приміщенні;  $S_{\Sigma}$  – площа обмежуючих поверхонь приміщення;  $\Omega$  – коефіцієнт осьової концентрації джерела звуку;  $D(\varphi)$  – його характеристика спрямованості;  $\varphi$  – кут між акустичною віссю джерела звуку і напрямом на дану точку приміщення.

Якщо врахувати, що  $\alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma} = \frac{0,161V}{T_{\text{р}}}$ , то вирази для визначення акустичного

відношення можна представити також таким чином:

$$R = 306 \frac{r^2 T_p}{V} (1 - \alpha_{cp}).$$

$$R' = 306 \frac{r^2 T_p}{V \Omega D^2(\varphi)} (1 - \alpha_{cp}).$$

Величина акустичного відношення росте при збільшенні відстані між джерелом звуку і слухачем, збільшенні часу реверберації, використанні менш направлених джерел звуку з малим значенням коефіцієнта осьової концентрації, зменшенні середнього коефіцієнта звукопоглинання поверхонь приміщення і об'єму останнього. При збільшенні відстані до джерела звуку акустичне відношення росте, що очевидно. При зменшенні об'єму приміщення акустичне відношення також зростає. Це означає, що при зменшенні об'єму приміщення частка дифузної енергії зростає значно швидше, ніж частка прямого звуку.

Зміна акустичного відношення сприймається при слуховій оцінці як зміна часу реверберації. Для музичних програм акустичне відношення доходить до 6...8, в окремих випадках до 10...12 (органна музика). При  $R < 2$  музичне звучання здається неприродно сухим. Для мовних програм звичайно  $R < 1$  [1]. Відстань до джерела звуку, при якому  $R = 1$ , називається *радіусом гулкості приміщення*. При великих відстанях  $\varepsilon_{\text{відб}} \gg \varepsilon_{\text{пр}}$  і в звучанні з'являється гулкість. Для одиночного джерела звуку радіус гулкості дорівнює

$$r_{\text{гул}} = \sqrt{\frac{\alpha_{cp} S_{\Sigma} \Omega D^2(\varphi)}{50,3(1 - \alpha_{cp})}}.$$

Звукова енергія в приміщенні за наявності в точці розташування слухача прямого і відбитого звуків у момент відключення джерела звуку (час  $t_1$ , рис. 1.4,б) змінюється стрибком (крива 1), що обумовлено зникненням поля прямого звуку  $\varepsilon_{\text{пр}}$  при виключенні джерела звуку. Розмір цього стрибка  $\Delta$  визначається акустичним відношенням. У ідеально дифузному полі  $R = \infty$  ( $\varepsilon_{\text{пр}} = 0$ ) згаданий стрибок відсутній (крива 3 на рис. 1.4, б).

Два процеси спаду звукової енергії в приміщенні – реальний із стрибком рівня в момент  $t_1$  (крива 1 на рис. 1.4,б) і без стрибка (крива 2) — оцінюються на слух як еквівалентні по гулкості, якщо точка їх перетину А відстоїть від моменту  $t_1$  на інтервал  $\Delta t \approx 0,2$  с. Час, протягом якого щільність звукової енергії цього еквівалентного процесу (крива 2) зменшується на 60 дБ (або в  $10^6$  разів) і визначає еквівалентний час (що відчувається на слух) реверберації  $T_{\text{ер}}$ . Очевидно, що, змінюючи  $T_{\text{ер}}$ , можна міняти суб'єктивне відчуття сприйманої реверберації. Як правило,  $T_{\text{ер}} < T_p$  і лише при  $R \rightarrow \infty$   $T_{\text{ер}} \approx T_p$ .

Еквівалентна реверберації  $T_{\text{ер}}$  істотно залежить від відстані між джерелом звуку і точкою розташування слухача або мікрофона, а також від характеристик спрямованості останнього. При малому значенні  $r$  вона помітно менше за  $T_p$  зважаючи на великий рівень прямого звуку. Сприймана реверберація в цьому

випадку ослабляється. При  $R > 3$  маємо  $T_{\text{ер}} \approx T_p$ . Час  $T_{\text{ер}}$  може бути малим при використанні гостронаправлених мікрофонів, орієнтованих на джерело звуку [1].

### Оптимальний час реверберації

Оптимальне значення стандартного часу реверберації, при якому звучання звукової програми сприймається найкращим чином, залежить від жанру самої програми, об'єму приміщення і частоти. Для двох основних видів мовних програм – мовних і музичних – оптимальне значення  $T_{\text{ропт}}$  істотно різне. В більшості випадків воно регламентується для частотного діапазону 125...4000 Гц.

Чим менший час реверберації, тим вище розбірливість мови. Проте дуже малий час реверберації робить звучання дуже сухим, обідняє його в тембральному відношенні. Збільшення  $T_p$  збагачує звучання, покращує чіткість і прозорість звучання, додає йому просторовість, об'ємність, гулкість, але погіршує умови сприйняття змістовної інформації при мовній передачі [1].

Для приміщень, призначених для відтворення мовних програм (лекційних аудиторій, дикторських студій тощо) час реверберації повинен залишатися практично постійним (0,25...0,5 с в залежності від об'єму приміщення) у смузі частот 125...4000 Гц. Оскільки низькочастотні компоненти спектру визначають в основному гулкість звучання, то зниження часу реверберації на низьких частотах певною мірою сприяє підвищенню розбірливості мови.

Тому, наприклад, в телевізійних студіях, де основним видом звучання є мова, рекомендується забезпечувати горизонтальну частотну характеристику часу реверберації в діапазоні 250...4000 Гц з плавним спадом  $\delta$  на нижчих частотах. На частоті 125 Гц розмір спаду  $\delta$  повинен складати 20...25 % від значення  $T_{p \text{ опт}}$  в смузі частот 500...4000 Гц (рис. 1.5, а). Конкретне значення  $T_{p \text{ опт}}$  залежить від розмірів студії і збільшується із збільшенням об'єму приміщення  $V$  [1].

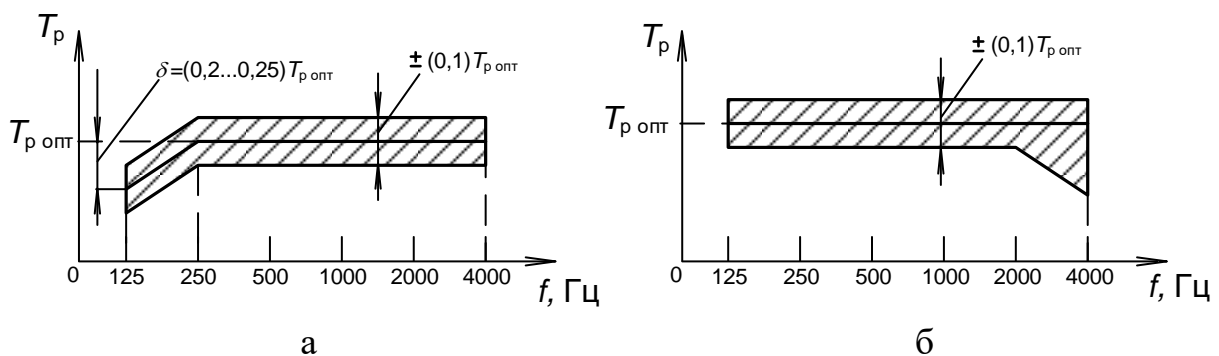


Рисунок 1.5 – Межі зміни часу стандартної реверберації в мовній (а) і музичній (б) студіях

У літературно-драматичних студіях, у театральних залах, а також кінозалах час реверберації повинен бути більше, щоб передати все багатство відтінків мови актора.

У музичних студіях, концертних залах оптимальний час реверберації істотно

більший, ніж в мовних. Це сприяє поліпшенню мелодійності, виразності звучання: багатшими, тонше нюансованими, природнішими сприймаються тембри інструментів; звучання набуває прозорості, ясності, чіткості, об'ємності. Все це позитивні сторони реверберації.

Для музичних студій оптимальне значення стандартного часу реверберації визначалося багатьма дослідниками як теоретичним, так і експериментальним шляхом.

На думку А.Н. Качеровича найбільшу перевагу можна віддати залежності

$$T_{p \text{ опт}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-2} k V^{1/3}}{-\ln(1 - \alpha)} = 0,009 A V^{1/3},$$

запропонованої Е. Майером і Р. Тіле. Тут  $k$  – поправочний коефіцієнт, який дорівнює 1 для приміщень об'ємом  $V$ , що не перевищує 2000 м<sup>3</sup>, і що поволі зростає при  $V > 2000$  м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – середнє значення коефіцієнта звукопоглинання, що залежить від призначення приміщення. Нижче приведені середні значення коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha$  для різних груп приміщень (незалежно від їх об'єму при  $k = 1$ ): концертний зал для виконання симфонічної музики - 0,19; оперний театр - 0,2; драматичний театр, кінозал - 0,22; естрадний театр - 0,25; ательє для озвучування при створенні ефекту відкритого простору - 0,45.

С.Я. Лівшиц запропонував іншу формулу для розрахунку оптимального часу реверберації у функції від об'єму:

$$T_{p \text{ опт}} = 0,41 \lg V.$$

Експериментальні залежності оптимального часу реверберації на середніх частотах (500 Гц) залежно від об'єму приміщення, одержані різними авторами, настільки сильно відрізняються один від одного, що використання їх для практичних розрахунків скрутно. Ці експериментальні дані з достатньою для практики точністю можуть бути замінені наступними наближеними виразами [1]:

для мови

$$T_{p \text{ опт}} = 0,3 \lg V - 0,05;$$

для творів малих музичних форм і опери

$$T_{p \text{ опт}} = 0,4 \lg V - 0,15;$$

для симфонічної музики

$$T_{p \text{ опт}} = 0,5 \lg V - 0,3;$$

де  $V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>. Ці формули справедливі для частоти 500 Гц.

Для кінотеатральних зал можна застосувати формулу для розрахунку оптимального часу реверберації

$$T_{p \text{ опт}} = 0,35 \lg V - 0,1.$$

Оптимальний час реверберації залежить від частоти. Відомо, що при значному підйомі характеристики реверберації у області нижніх частот приміщення стає "гучним", що призводить до зниження артикуляції і неприємному звучанню музики. Різке зниження часу реверберації на вищих частотах позначається на маскуванні приголосних звуків мови і позбавляє

"яскравості" звучання музики. Велике значення тут має і слухацький досвід.

Частотна характеристика оптимального часу реверберації повинна бути такою, щоб окремі спектральні складові складного звучання не могли б за рахунок реверберації підкреслюватися або пригнічуватися одна щодо іншої. Для музичних студій переважнішою є горизонтальна форма частотної характеристики  $T_{p \text{ опт}}$ . При цьому в крупних студіях (з площею підлоги більше 450 м<sup>2</sup>) на верхніх частотах допускається спад часу реверберації, обумовлений поглинанням звуку в повітрі (див. рис. 1.5, б), а на нижніх частотах його підйом (див. рис. 1.5, в).

Із збільшенням об'єму музичної студії час  $T_{p \text{ опт}}$  зростає (див. рис. 1.5, г). Проте в студіях об'ємом більше 2000...5000 м<sup>3</sup> на величину  $T_{p \text{ опт}}$  набагато сильніше впливає жанр твору.

Апаратні і кімнати прослуховування по своїх параметрах близькі до мовних студій. Оптимальне значення часу реверберації для них рекомендується вибирати із співвідношення

$$T_{p \text{ опт}} = T_p \sqrt[3]{\frac{V}{V_0}}$$

де  $V_0 = 100 \text{ м}^3$ ,  $T_p = 0,28 \pm 0,05 \text{ с}$ ;  $V$  – об'єм приміщення (змінюється звичайно в межах 100...300 м<sup>3</sup>).

Частотна характеристика часу реверберації – горизонтальна пряма з відхиленням  $\pm 0,05 \text{ с}$ , на частотах нижче 160 Гц поле допуску збільшується до  $\pm 0,1 \text{ с}$ .

Оптимум і форма частотної характеристики часу реверберації в приміщеннях, в яких необхідно забезпечувати відповідні акустичні умови, різного призначення але однакового об'єму можуть коливатися в досить широких межах залежно від форми приміщення і його висоти, розташування звукорозсіювальних конструкцій, варіантів розміщення джерел звуку, слухачів, технології звукозапису для студій тощо. Тому рекомендовані деякими нормативними документами оптимальні значення часу реверберації слід розглядати як первинні початкові дані, що підлягають уточненню в процесі акустичного налаштування приміщення. Елементи акустичного налаштування приміщення повинні бути передбачені у обов'язковому порядку вже на стадії проектування цих приміщень.

Оптимальний час реверберації для окремих приміщень наведено на рис. 1.6...1.7 [4].



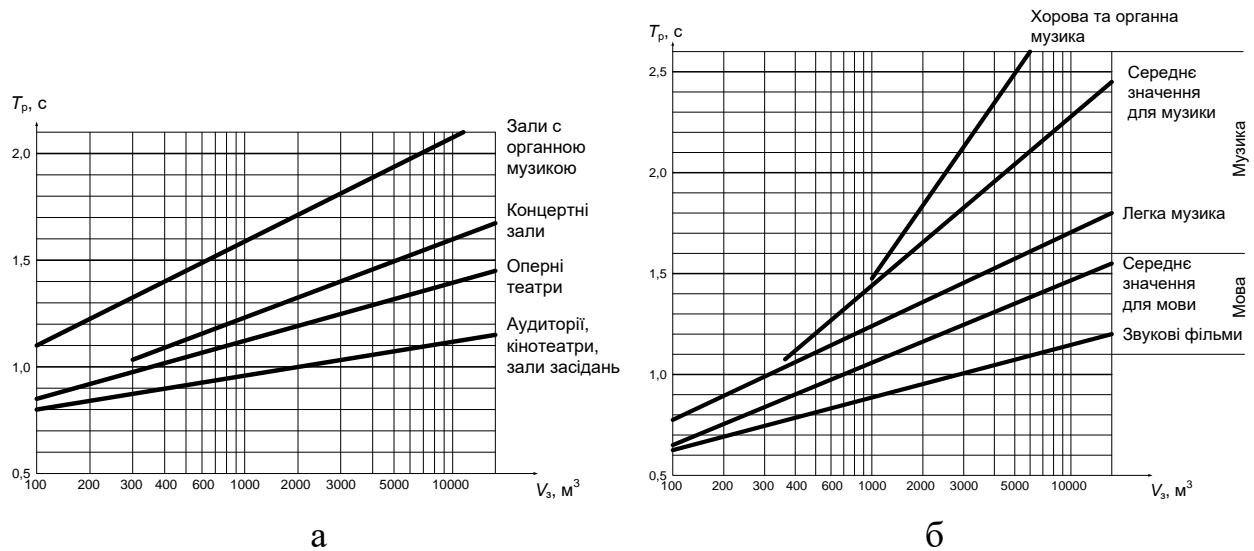


Рисунок 1.6 - Залежність часу реверберації для приміщень різного призначення (а) та різноманітних видів звукових програм (б) від об'єму приміщення на частоті 500 Гц

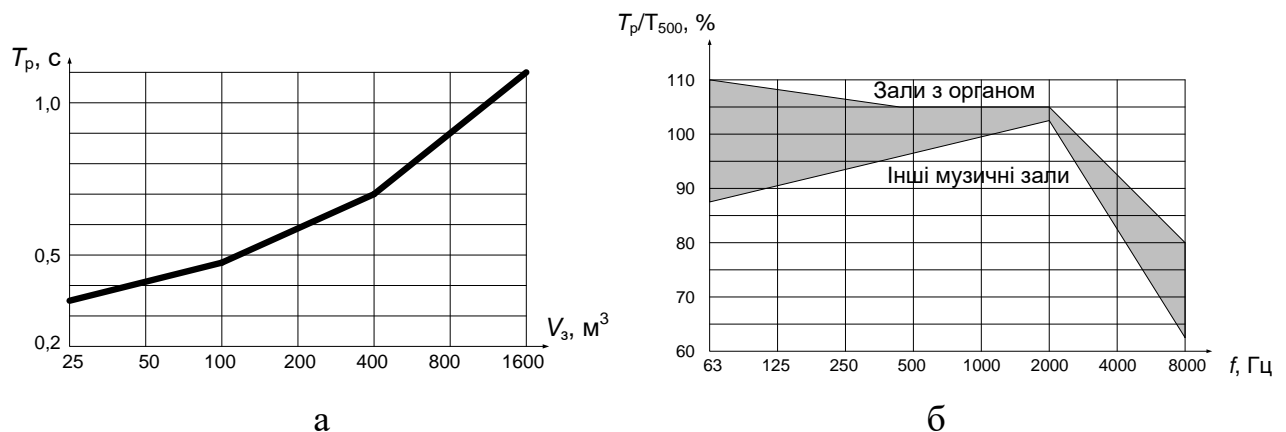


Рисунок 1.7 - Залежність часу реверберації для мовних студій (а) та музичних залів (б) від об'єму приміщення на частотах 500...1000 Гц

### 1.3 Звуковий фон в приміщенні

Найважливішою акустичною характеристикою приміщень, для яких необхідно забезпечувати відповідні акустичні умови – **акустично визначених приміщень** (студії звукового і телевізійного мовлення, кінозали, театральні та концертні зали, аудиторії тощо) є припустимий рівень шуму, який утворює звуковий фон приміщення. Він складається з чотирьох основних складових: шумів, що проникають у визначене приміщення з суміжних приміщень унаслідок звукопровідності стін, підлоги і стелі; структурних звуків, що розповсюджуються по конструкціях будівлі і обумовлених вібрацією машин і механізмів, так званих повітряних шумів, що створюються системою кондиціонування і вентиляції; шумів технологічного устаткування, встановленого у приміщенні й шумів створюваних присутніми у приміщенні людьми [1].

Припустимий рівень звукового тиску шуму  $L_a$  залежить від частоти  $f$  (рис. 1.8). Стосовно студій цій залежності відповідає рівень гучності звукового фону близько 20 фон, а для кінотеатральних зал – приблизно 35 фон.

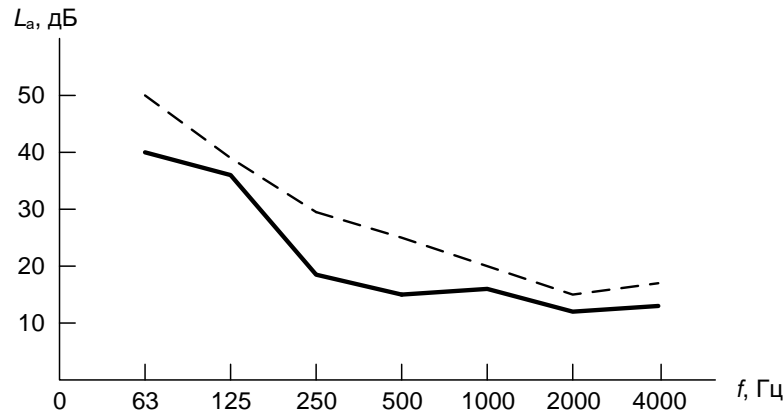


Рисунок 1.8 – Залежність допустимого рівня звукового тиску шуму в радіомовних (1) і телевізійних (2) студіях від частоти

Рівень акустичних шумів, що приникають у приміщення із суміжних приміщень визначається акустичною потужністю джерела звуку суміжного приміщення та звукоізоляцією перегородки між приміщеннями.

У додатку Г наведено орієнтовні рівні корисного звукового сигналу та припустимі рівні шуму у деяких приміщеннях та на вулиці.

Звуковий фон у приміщенні, що створюється акустичними сигналами із суміжних приміщень визначається за формулою

$$L_{\phi} = 10 \lg \frac{I'_{\text{зв}}}{I_{\text{зв}0}} = 10 \lg \left[ \frac{1}{\alpha S_{\Pi}} \sum_1^6 S_{\Pi} \cdot 10^{0,1(L_{\text{СП}} - \sigma_{\Pi})} \right] = 10 \lg \sum_1^6 S_{\Pi} \cdot 10^{0,1(L_{\text{СП}} - \sigma_{\Pi})} - 10 \lg \alpha S_{\Pi},$$

де  $I_{\text{зв}0}$  – інтенсивність звуку, що відповідає стандартному порогу чутності;  $I'_{\text{зв}} = \varepsilon_{\text{АП}} c_{\text{зв}}$  – інтенсивність звуку в акустично визначеному приміщенні ( $I'_{\text{зв}} = 4P'_a / (\alpha S)$ );  $I_{\text{зв}} = \varepsilon_0 c_{\text{зв}}$  – інтенсивність звуку, що падає на перешкоду (перегородку) із суміжного приміщення, в якому встановлена стала щільність звукової енергії

$$\varepsilon_0 = \frac{4P_a}{c_{\text{зв}} \alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma}}; P_a - \text{акустична потужність джерела звуку суміжного приміщення};$$

$$\varepsilon_{\text{АП}} = \frac{4P'_a}{c_{\text{зв}} \alpha S_{\Pi}} = \frac{4}{c_{\text{зв}} \alpha S_{\Pi}} \sum_1^6 \frac{I_{\text{зв}} S_{\Pi}}{4} \gamma_{\Pi} - \text{стала щільність звукової енергії в акустично}$$

визначеному приміщенні;  $P'_a$  – звукова потужність, яка проникає з суміжного приміщення в акустично визначене приміщення через стіну (перешкоду)

$$P'_a = \frac{\varepsilon_0 c_{\text{зв}} S_{\Pi}}{4} \gamma_{\Pi} = \frac{I_{\text{зв}} S_{\Pi}}{4} \gamma_{\Pi} \quad \text{або} \quad P'_a = \sum_1^6 \frac{I_{\text{зв}} S_{\Pi}}{4} \gamma_{\Pi} - \text{сумарна потужність звуку, що}$$

проникає в акустично визначене приміщення з суміжних приміщень, де число перешкод (перегородок), що обмежують студію, дорівнює 6;  $\alpha$  – коефіцієнт звукопоглинання;  $\gamma_{\Pi}$  – коефіцієнт звукопровідності перешкоди (перегородки),  $S_{\Pi}$  –

площа перешкоди;  $\sigma_{\Pi} = 101g(1/\gamma_{\Pi})$ ,  $\sigma_{\Pi} = 101g \frac{1}{\gamma_{\Pi}} = 101g \frac{I_{\text{звпад}}}{I_{\text{зв0}}} - 101g \frac{I_{\text{звпр}}}{I_{\text{зв0}}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}}$  -

– коефіцієнт звукоізоляції, що показує, яка частина звукової енергії затримується перешкодою, дБ;  $\alpha S$  – загальне звукопоглинання у акустично визначеному приміщенні;  $L_{\text{СП}} = 101g(I_{\text{зв}}/I_{\text{зв0}})$  – рівень інтенсивності звуку у суміжному із акустично визначеним приміщенням приміщенні, дБ;  $L_{\text{пад}}$  – рівень інтенсивності звуку із зовнішньої сторони перешкоди (тобто, що падає на перешкоду);  $L_{\text{пр}}$  – рівень інтенсивності звуку з внутрішньої сторони перешкоди в акустично визначеному приміщенні (тобто, що пройшов через перешкоду).

Відмітимо, що рівень звукового фону  $L_{\text{ф}}$  в приміщенні визначається не тільки рівнем інтенсивності  $L_{\text{СП}}$  звуку в суміжних приміщеннях і звукоізоляцією стін, але і звукопоглинанням  $\alpha S$  студії. У гучному приміщенні  $L_{\text{ф}}$  зростає унаслідок збільшення  $\varepsilon_0$ , що пов'язано із зростанням  $T_{\text{р}}$ . У сильно заглушених приміщеннях рівень звукового фону практично визначається звукоізоляцією стін.

Для зменшення шумів, що проникають у акустично визначене приміщення із суміжних приміщень необхідно обирати елементи конструкції архітектури і перегородки між приміщеннями з необхідним коефіцієнтом звукопровідності, розташовувати (оточувати) акустично визначені приміщення серед приміщень з мінімальними «корисними» рівнями у цих приміщеннях, самі будівлі розміщувати на тихих вулицях, входи облаштовувати тамбурами. Двері у акустично визначене приміщення виконують, як правило, подвійні з масивними полотнами багат шарової конструкції з герметизуючими прокладками, що забезпечують щільне прилягання дверей до дверної коробки.

Стіни приміщень виконуються значної товщини (звичайно з цегли), що дозволяє забезпечити високу звукоізоляцію. Для підвищення звукоізоляції перегородки (стіни) студій часто роблять шаруватими (багат шаровими), підбираючи для них матеріали з акустичними опорами, які різко відрізняються. Стіни виконують подвійними з проміжком, заповненим матеріалом, що добре поглинає звук. Самі стіни (для зменшення мембранного перенесення) повинні бути масивними, щоб їх резонанс був на дуже низьких частотах. Для захисту перегородок від вібрації їх встановлюють на віброізоляційні прокладки.

Оглядові вікна між приміщеннями, якщо вони є, або які виходять на вулицю мають тришарову конструкцію з товстих стекол завтовшки 6...9 мм. Всі стекла ізолювані по периметру прокладками з профільної гуми, що забезпечують їх щільне, без щонайменших щілин, прилягання до рам.

Для зменшення рівня шумів, що проникають в акустично визначене приміщення по каналах вентиляційних систем, останні обладнуються глушниками осередкового, пластинчастого і камерного типів. Внутрішні поверхні глушників покриваються звукопоглинальними матеріалами, наприклад повстю.

Для захисту приміщень від структурних звуків, що розповсюджуються по конструкціях будівлі, часто використовується схема, що одержала назву "коробка

в коробці". Акустично визначене приміщення при цьому має окремий фундамент, на якому вмонтовуються його стіни, що являє собою внутрішню "коробку". На відстані 200...500 мм від неї споруджується зовнішня "коробка", поверхні якої можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми стінами будівлі. Подібна подвійна огорожа забезпечує високу звукоізоляцію від повітряного шуму і ефективно знижує структурні звуки. Іноді внутрішня "коробка" не має окремого фундаменту, а підвішується на пружинах або гумових амортизаторах.

Для ослаблення рівня структурного шуму, обумовленого вібрацією огорож акустично визначеного приміщення, застосовують "плаваючі" конструкції підлоги, підвісні стіни і стеля. Основними елементами таких конструкцій є гнучкі прокладки, пружини, еластичні підвіски.

У додатку Д наведені значення власної звукоізоляції окремих перегородок.

#### 1.4 Забезпечення оптимальних акустичних умов у приміщеннях

Для створення оптимальних акустичних умов у акустично визначених приміщеннях застосовуються звукопоглинальні матеріали і конструкції, а також звукокорозіювальні елементи і конструкції, якими покривають і оздоблюють поверхні приміщення. При цьому основним акустичним параметром приміщення вважається стандартний час реверберації. Без застосування звукопоглинальних матеріалів час реверберації в приміщенні перевищує необхідне оптимальне значення.

Звукопоглинальні матеріали і конструкції характеризуються коефіцієнтом звукопоглинання. Коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha$  називають відношення енергії звукової хвилі, що поглинається до енергії, що падає на поверхню. Якщо енергію звукової хвилі виразити інтенсивністю, то  $\alpha = I_{\text{погл}} / I_{\text{пад}}$ .

Якщо розміри поверхні поглинаючого матеріалу великі в порівнянні з довжиною падаючої хвилі, а його товщина практично нескінченна, то коефіцієнт звукопоглинання буде визначатися формулою

$$\alpha = 1 - \left[ \frac{\rho c_{\text{зв}} - 413}{\rho c_{\text{зв}} + 413} \right]^2,$$

де  $\rho c_{\text{зв}}$  – питомий акустичний опір поглинаючого матеріалу, кг/(м<sup>2</sup>с); 413 кг/(м<sup>2</sup>с) – питомий акустичний опір повітря. Таким чином звукопоглинання залежить від акустичного опору матеріалу по відношенню до акустичного опору повітря.

Коефіцієнт звукопоглинання матеріалів залежить від частоти звукового сигналу, що дозволяє забезпечувати оптимальне звукопоглинання у приміщенні у всьому частотному діапазоні.

За принципом дії звукопоглинальні матеріали підрозділяються на суцільні, пористі з жорстким або пружним скелетом, резонансні (мембранні і перфоровані) [2].

Суцільні звукопоглинальні матеріали мають акустичний опір завжди більший ніж у повітря, а пористі у більшості випадків менше його.

Пористі матеріали завжди комбінують з суцільними, розташовуючи суцільні позаду пористих. При цьому найменше поглинання у пористого матеріалу утворюється при його розташуванні впритул до стіни із суцільного матеріалу, що добре відбиває звукову енергію, і найбільше - при розташуванні його на відстані чверті довжини звукової хвилі (у повітрі) від поверхні матеріалу, що добре відбиває звук. Дещо менше поглинання спостерігається при відстанях  $3/4\lambda$  і  $5/4\lambda$ . При більшому віддаленні від стіни коефіцієнт поглинання залишається постійним.

Для поглинаючого матеріалу з розміром, порівняним з довжиною звукової хвилі, коефіцієнт поглинання залежить від співвідношення між ними. Так, наприклад, відкрите вікно має коефіцієнт поглинання більше одиниці, особливо на низьких частотах (енергія звукових хвиль, що падають поруч з вікном, йде в нього із-за явища дифракції). Коефіцієнт поглинання порт'єри з невеликими розмірами у порівнянні з довжиною звукової хвилі більше, ніж порт'єри з великими розмірами, тому краще мати ряд вузьких порт'єр, ніж одну широку (при рівній загальній ширині).

Жорсткі пористі матеріали складаються із заповнювачів у вигляді мінеральної крихти, гравію, шлаку, пемзи і терпких матеріалів, таких як цемент, алебастр, синтетичні смоли. У пористих матеріалах з пружним скелетом стінки пір здатні деформуватися під впливом звукових хвиль. Такі листи з паперової маси (інсуліт, арборит), пружні будівельні матеріали (фенолова повсть, мінеральна вата, скловолокно). Сюди ж відносяться різні драпіровки і килими [2].

На рис. 1.9, наведено частотні характеристики коефіцієнтів поглинання пористих матеріалів. З графіків видно, що пористі звукопоглинальні матеріали дають переважне поглинання в області високих частот і дуже неефективні в нижній частині частотного діапазону.

Іншою поширеною конструкцією звукопоглинального матеріалу є резонансні поглиначі. Вони діляться на мембранні і резонаторні.

Мембранні поглиначі являють собою натягнуте полотно або тонкий фанерний лист, під яким розміщений добре демпфірувальний матеріал (матеріал з великою в'язкістю, наприклад, деякі сорти губчастої гуми, поролонові килимки, будівельна повсть та ін.). Щити з натягнутим полотном називають щитами Бекеші. Максимум їх поглинання спостерігається на резонансних частотах:

$$f_{0k} = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho b h}},$$

де  $F$  – сила, з якою натягнуто полотно;  $\rho$  – щільність матеріалу полотна; ( $l$ ,  $b$ ,  $h$  – довжина, ширина, товщина полотна;  $k$  – порядок резонансної частоти).

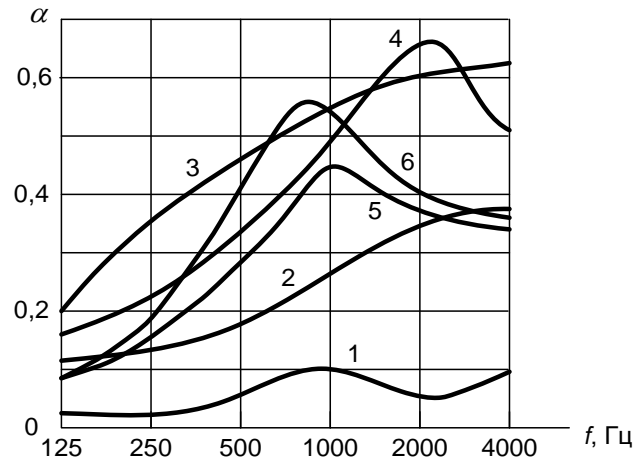


Рисунок 1.9 – Частотні характеристики коефіцієнта звукопоглинання для пористих акустичних матеріалів: 1 – вапняна штукатурка по дерев'яній обрешітці; 2 – килим з ворсом, що лежить на бетонній підлозі; 3 – арборит у плитах товщиною 2 см; 4 – фіброакустит в плитах товщиною 3,5 см; 5 – драпірування на стіні; 6 – драпірування на відстані 10 см від стіни

Резонансними поглиначами можуть служити, наприклад, тонкі пластини, що коливаються під впливом звукової хвилі, при цьому частина звукової енергії витрачається на тертя. Звукопоглинання їх стає максимальним при резонансі, коли амплітуда коливань пластини стає найбільшою. Мембранні конструкції є дерев'яними рамами, на яких кріпляться тонкі листи з фанери, пластмаси, полімерної плівки і т.п. Повітряний зазор між шаром і стіною іноді заповнюється розпушеним пористим матеріалом.

Коефіцієнт поглинання можна розрахувати, якщо знати в'язкість матеріалу, розташованого під фанерою, але практично такий розрахунок дуже неточний.

На рис. 1.10 наведені коефіцієнти поглинання для фанерних щитів, розташованих близько від стіни з заповненням проміжку між ними демпфівальним матеріалом.

Перфоровані поглиначі є пористо-коливальними системами і являють собою систему повітряних резонаторів, наприклад резонаторів Гельмгольца, в гирлі яких розташований демпфівальний матеріал із шару м'якого пористого матеріалу, що примикає до стіни і закритого жорсткою перфорованою пластиною [2].

Резонансна частота резонатора:

$$f_0 = \frac{c_{зв}}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}}$$

де  $S$  - поперечний переріз горла резонатора,  $l$  - довжина горла;  $V$  - об'єм порожнини резонатора.

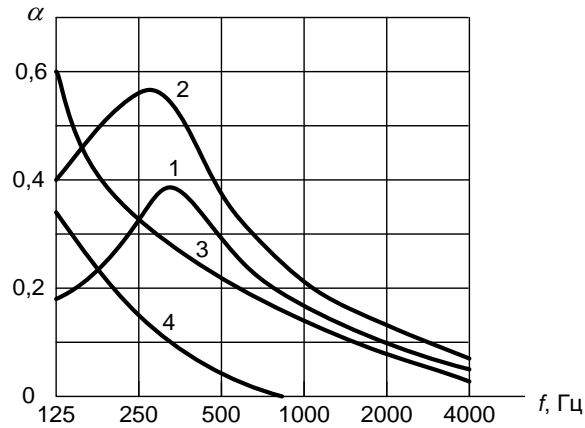


Рисунок 1.10 – Частотні характеристики коефіцієнта звукопоглинання для панелей, що резонують на нижніх частотах: 1 – фанера завтовшки 3 мм з повітряним проміжком 5 см; 2 – те ж саме, але краї демпфировані скловатою; 3 – фанера завтовшки 6 мм з повітряним проміжком 10 см, краї задемповані мінеральною ватою; 4 – віконне скло

Найбільш поширена конструкція резонаторних поглиначів - перфорований лист, розташований на деякій відстані від твердої стіни. Така конструкція може розглядатися як ряд резонаторів. Якщо перфорація розподілена по поверхні листа рівномірно, то такий поглинач матиме типову резонансну криву поглинання, а якщо нерівномірно, то можна отримати рівномірну криву поглинання. Для рівномірного розподілу отворів резонансна частота

$$f_0 = \frac{c_{зв}}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_e d^2 h}}$$

де  $S$  - перетин отвору;  $l_e = \delta + 0,5\sqrt{\pi S}$  - ефективна товщина листа;  $\delta$  - товщина листа;  $h$  - відстань від стіни (стелі);  $d$  - відстань між отворами

Замість ряду отворів застосовують щілини в таких листах. Резонансна частота в цьому випадку

$$f_0 = \frac{c_{зв}}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{ldh}}$$

де  $b$  - ширина щілини;  $d$  - відстань між щілинами;  $h$  - відстань від стіни (стелі);  $l$  - ефективна товщина листа.

Коефіцієнт поглинання резонатора визначається активним акустичним опором демпфировального матеріалу, що знаходиться в горлі резонатора. Як такий опір зазвичай застосовують металеву сітку. Коефіцієнт поглинання залежить від числа і розмірів осередків такої сітки. Сітку розташовують під листом з перфорацією. Рідше застосовують для цього тканину, так як вони негігієнічні.

На рис. 1.11, б наведені характеристики поглинання деяких перфорованих конструкцій (застосовуваних для акустичної обробки приміщень) при різній їх товщині  $\delta$ , відстані від стіни  $h$  і між отворами  $d$ , діаметрі отвори  $D$ .

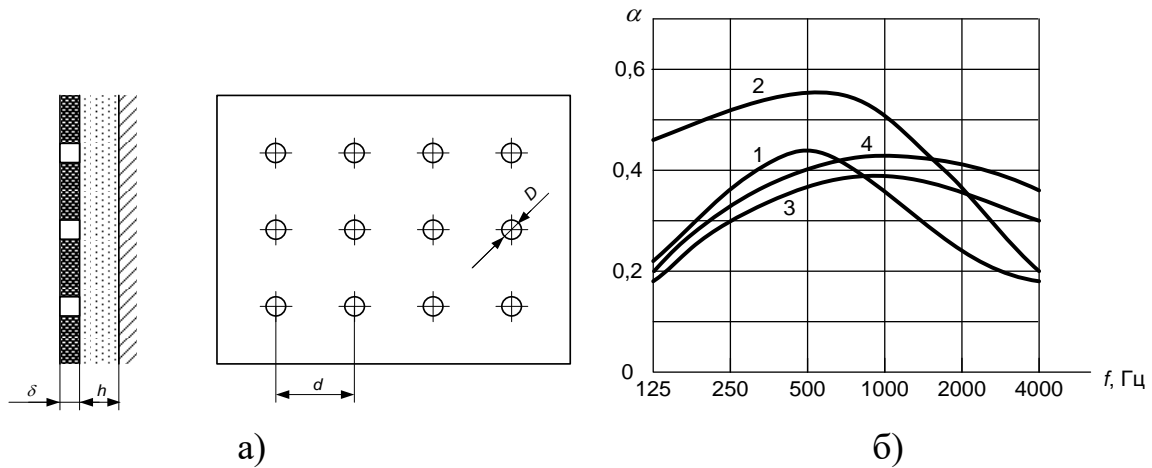


Рисунок 1.11 – Ескіз конструкції (а) і залежність коефіцієнта звукопоглинання перфорованих резонаторних панелей від частоти при різній їх товщині  $\delta$ , діаметрі отворів  $D$  і відстані від стіни  $h$  (б): 1 – для матеріалу з  $\delta = 3$  мм,  $D = 7$  мм,  $d = 3$  см і  $h = 5$  см; 2 – для того ж матеріалу при віднесенні від стіни на відстань  $h = 10$  см; 3 – для фанери з щілиною 45 мм,  $\delta = 3$  мм, відстань між щілинами 6,5 см, фанера підклеєна тканиною; 4 – той же матеріал,  $\delta = 3$  мм з щілиною 45 мм без підклеювання тканиною, але із заповненням повітряного проміжку матами з азбестової вати

У додатку В наведені коефіцієнти поглинання для ряду звукопоглинальних матеріалів, що найбільш часто застосовуються для акустичного оформлення приміщень. У цих таблицях коефіцієнти поглинання для слухачів, крісел і стільців наведені на 1 одиницю, а інші - на  $1 \text{ м}^2$ .

У акустично визначених приміщеннях, як правило, використовують наступні типи конструкцій вищеназваних звукопоглиначів:

- пористі акустичні плити (наприклад, типу Акмігран, ПАО, ПАС), коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha$  яких звичайно має максимальне значення в області середніх і верхніх частот звукового діапазону (у нижній частині частотного діапазону вони неефективні);

- перфоровані резонансні панелі, що найчастіше є шаром ефективного звукопоглиначя (мінеральної вати, скловолосна і т.п.), обернутого склотканиною і закритого зовні перфорованим листом. Як останнє використовується фанера завтовшки 4...5 мм, а також гіпсові або металеві листи. Частотна залежність коефіцієнта  $\alpha$  цих конструкцій має резонансний характер, причому залежно від розміру перфораційних отворів, відстані між ними, товщини наповнювача і інших чинників вдається змінювати положення максимуму звукопоглинання на осі частот, що вельми зручно при акустичному налаштуванні приміщень; максимум звукопоглинання спостерігається у області середніх частот;

- панелі, що резонують на нижніх частотах, наприклад листи гладкої фанери, сухої штукатурки, деревно-стружкові плити, що розташовані звичайно на деякій відстані від жорсткої поверхні стіни. Коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha$  цих



конструкцій максимальний в області частот 100...300 Гц і зміщується у бік нижчих частот при збільшенні повітряного проміжку між панеллю і поверхнею стіни (стелі).

Звукопоглинальні матеріали конструкції з різними акустичними характеристиками розміщують за можливістю рівномірно на поверхнях приміщення, що сприяє підвищенню дифузності звукового поля. Застосовують також звукорозсіювальні конструкції, які частково розташовують на бічних стінах (напівколони, різної форми опуклі поверхні), але в основній масі на стелі. Їх звукопоглинання максимально в області нижніх частот.

Підлога у акустично визначених приміщеннях звичайно паркетна, при необхідності частково покривається килимом. У деяких приміщеннях останніми роками широко використовують наливна пластмасова підлога, яка зручна в експлуатації і не створює шуму при переміщенні людей і обладнання. Така підлога виготовляється з мастики, що готується на основі полівінілацетатної емульсії з додаванням піску і пігментів.

Для оперативної зміни часу реверберації, наприклад, в музичних і літературно-драматичних студіях іноді використовують "механічні" способи варіювання фонду звукопоглинання [4]. До них відносяться:

- поворотні щити, що укріплюються на поверхнях приміщення; при їх повороті або відкривається доступ до звукопоглинального матеріалу, або цей матеріал закривається щитами з поверхнею, що відбиває звук;
- різноманітні за розміром вали з намотаним на них звукопоглинальним матеріалом (різного роду драпіровки, за допомогою яких прикриваються або відкриваються звуковідбивні поверхні стін);
- розсувні панелі, що змінюють площу поверхні того або іншого звукопоглинального матеріалу;
- поворотні колони, кожна половина поверхні яких оброблена своїм звукопоглинальним матеріалом.

## ВИСНОВКИ

Враховуючи закони розповсюдження звукової енергії у приміщення та методи оцінки акустичних умов у приміщенні можна зазначити, що основними акустичними характеристиками приміщення, що можуть бути виміряні в умовах навчального процесу, є такі:

- час реверберації, що визначається часом спадання звукової енергії після відключення джерела звуку;
- рівень сторонніх шумів, що визначається рівнями звукових сигналів у суміжних приміщеннях;
- загальне звукопоглинання, що визначається звукопоглинальними властивостями наявних у приміщенні матеріалів та об'єктів.

## **2 МЕТОДИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИМІЩЕНЬ**

Для вимірювання акустичних параметрів приміщень застосовується така вимірювальна апаратура - тональні генератори, електронні вольтметри, вимірювачі рівня, осцилографи, аналізатори гармонік, вимірювальні підсилювачі тощо. Крім апаратури загального застосування при акустичних вимірюваннях застосовують спеціальну вимірювальну апаратуру, до якої відносяться: тональні генератори з виючим тоном, шумові генератори, вимірювачі звукового тиску, шумоміри, октавні фільтри, швидкодіючі реєстратори рівня, реверберометри, штучний рот, штучне вухо, спектральні аналізатори, аналізатори амплітудних розподілів тощо. Для виконання більшості робіт в навчальній лабораторії застосовуються такі засоби - звукова колонка; конденсаторний або динамічний мікрофон, мікшерний пульт, професійний аудіоаналізатор РААЗ, вимірювач шумів, генератор тестових сигналів, мілівольтметр, персональний комп'ютер.

За допомогою такого вимірювального обладнання можна визначати більшість акустичних параметрів приміщення та параметрів звукопоглинальних і звукоізоляційних матеріалів та конструкцій, проводити аналіз акустичних сигналів і шумів і записувати часові процеси в приміщеннях і т. д. Більшість акустичних параметрів є частотно-залежними, тому в процесі виконання лабораторних робіт застосовується визначений, в залежності від вимірюваного параметру, ряд тональних частот, або тональних шумів, або частотно-модульованих тестових сигналів. Як переважний ряд частот застосовуються такі частоти: 20; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000; 12000; 16000; 20000 Гц.

### **Вимірювання часу реверберації в заданих приміщеннях**

Для вимірювання часу реверберації у приміщеннях традиційно використовують реверберометр (див. рис. 2.1, а) [3]. Як тестові сигнали для вимірювання часу реверберації застосовуються сигнали виючого тону, або вузькосмугові шумові сигнали, адже у в реальних приміщеннях не завжди можна гарантувати дифузність поля. Вимірювання проводяться у декількох точках приміщення, застосовуючи мікрофон, що хитається.

В умовах дифузного поля стандартний час реверберації визначається як час, за який рівень сигналу знизиться на 60 дБ. В умовах реального звукового поля вимірювання часу реверберації необхідно проводити декілька разів, вимірюючи перепад рівнів для декількох значень часових затримок, а потім усереднювати отримані результати або ж будувати криву загасання рівнів по вимірним перепадах і потім графічно визначати час стандартної реверберації.

Можна також визначити зниження рівня  $\Delta L$  для визначеної затримки і обчислити час стандартної реверберації за формулою  $T=60\tau/\Delta L$ . Але так як

звукове поле відхиляється від дифузного, особливо в звичайних приміщеннях, то доводиться вимірювати перепад рівнів для декількох значень часової затримки й усереднювати отримані результати або ж будувати криву загасання рівнів по виміряних перепадах їх і потім графічно визначати час стандартної реверберації (див. рис, 2.1, б).

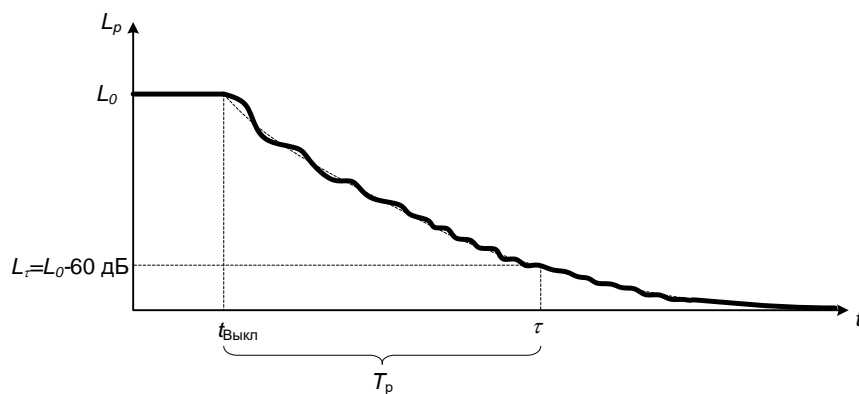
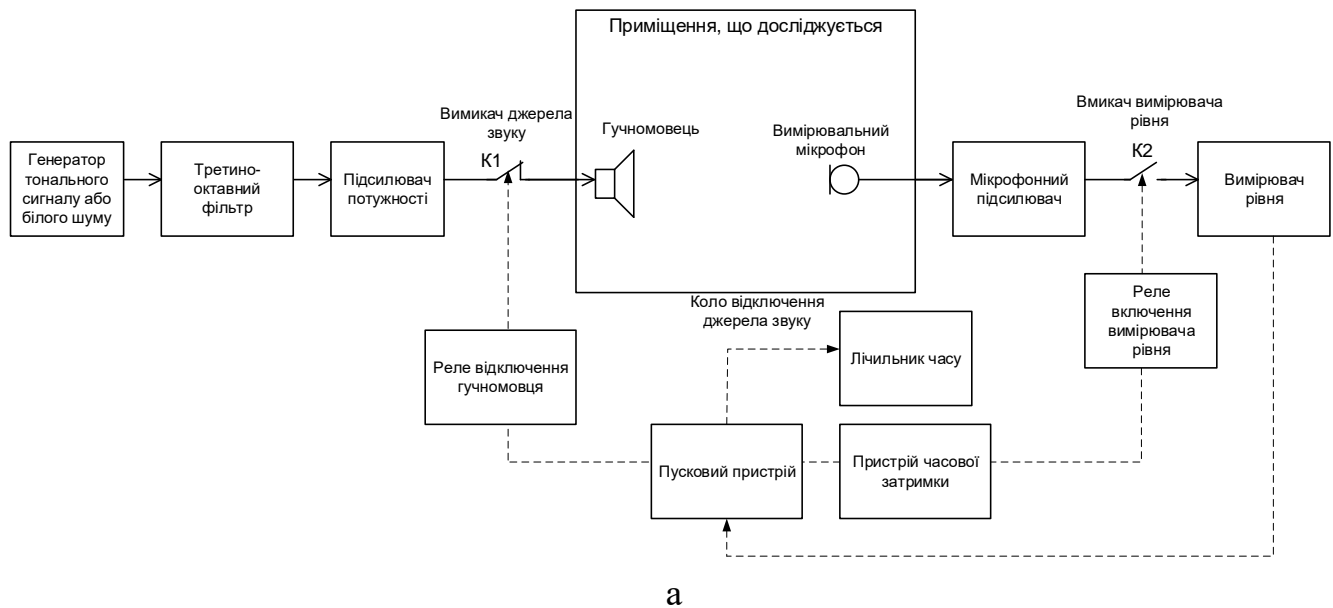


Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювання часу реверберації за допомогою реверберометра (а), й графік визначення ЧР (б)

Структурна схема макету з вимірювання часу реверберації із застосуванням програмного звукового редактора Sound Forge наведена на рис. 2.2, а на рис. 2.3 наведена структура технологічного процесу вимірювання часу реверберації та відображення на екрані монітору результатів вимірювань.

Розглянемо технологію проведення вимірювання часу реверберації із застосуванням шумового сигналу спираючись на структурну схему макету. Вимірювання часу реверберації на визначених частотах аналогічно вимірюванню із застосуванням шумового сигналу, а як джерело застосовується генератор звукових частот. Частоти змінюються по чергові від 125 Гц до 4 кГц, при цьому вимірюється час спадання сигналу для кожної частоти.

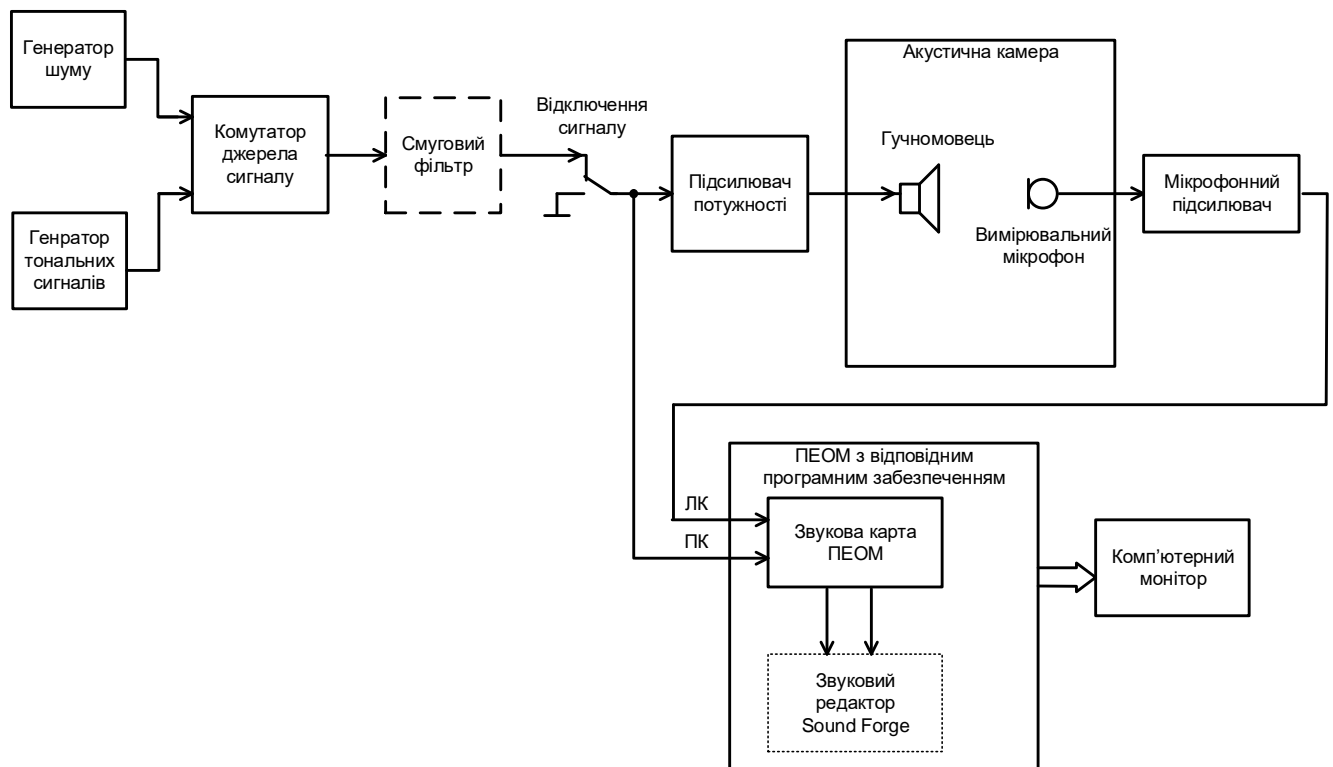


Рисунок 2.2 – Структурна схема макету з вимірювання часу реверберації

Шумовий сигнал, відтворюваний відповідним пристроєм, в момент часу  $t_0$  підключається до підсилювача потужності, де підсилюється до необхідного рівня, і відтворюється гучномовцем в акустичній камері. Гучномовець створює акустичне звукове поле в приміщенні акустичної камери. Камера в цей час зачинена і звукоізована від зовнішнього шуму.

Звуковий сигнал, як акустичні коливання сприймається мікрофоном, підсилюється до лінійного рівня за допомогою мікрофонного підсилювача і подається на один із каналів звукової карти ПК, на другий канал якої подається сигнал з входу підсилювача потужності.

В момент часу  $t_1$  відтворення сигналу відключається.

В процесі вимірювання часу реверберації комп'ютер включається в режим запису звукового сигналу у реальному часі, що забезпечується програмним продуктом, наприклад, звуковим редактором Sound Forge. Запис включається незадовго перед часом  $t_0$ , а виключається через декілька секунд після часу  $t_1$ .

Після проведення запису на екрані монітора відображається записаний сигнал, причому в одному каналі відображається сигнал, відтворюваний до гучномовця, а у другому каналі – сигнал, перетворений з акустичного в електричний мікрофоном, тобто, умовно вторинний сигнал створений акустикою камери (рис. 2.3, б).



Провівши розгортку зображення за віссю абсцис, можна спостерігати процес спадання звукової енергії в акустичній камері після відключення гучномовця (рис. 2.3, в). Для вимірювання часу реверберації, що відповідає спаданню рівня сигналу на 60 дБ, необхідно розгорнути зображення на екрані монітора за віссю ординат до появи позначення -30 дБ, що відповідатиме половині часу реверберації і потім визначити безпосередньо  $T_p$  (рис. 2.3, г).

Разом з вимірюванням реверберації в приміщенні можна також спостерігати процес наростання звукової енергії в приміщенні (рис. 2.3, д).

### **Вимірювання коефіцієнтів поглинання звуку в ревербераційній камері**

У цьому випадку вимірюють дифузний коефіцієнт поглинання, що часто використовується при розрахунках часу реверберації. У ревербераційній камері вимірюють час реверберації до ( $T_1$ ) та після ( $T_2$ ) внесення туди поглинального матеріалу площею  $S$ . Відповідно коефіцієнт поглинання буде визначатися за формулою [3]

$$\alpha_x = 0,161 \frac{V}{S_x} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right],$$

де  $V$  - об'єм камери,  $\text{м}^3$ .

При цих вимірюваннях матеріал повинен бути розташований так, як він буде встановлений (наприклад, з урахуванням того матеріалу, який буде знаходитися за ним). Розміри зразків повинні бути такими ж, як і в натурі, або у всякому разі бути більше найдовшої довжини хвилі.

### **Вимірювання звукоізоляції перегородок**

Ці вимірювання передбачають вимірювання рівнів звукового тиску перед перегородкою  $L_1$  і після неї  $L_2$ . Вимірювання проводять в ревербераційній камері (рис. 2.4). Перегородку щільно монтують в товсту стіну без щілин з віброізоляцією від інших стін. Розміри перегородок беруть за можливістю натурними, але не менше  $10 \text{ м}^2$  і мінімальні розміри не менше 2,5 см. Звукоізоляція перегородки з урахуванням збільшення рівня в ревербераційній камері

$$\sigma_{\text{пер}} = L_1 - L_2 + 10 \lg \left( \frac{S_{\text{пер}}}{A} \right),$$

де  $S_{\text{пер}}$  - площа перегородки;  $A$  - загальне поглинання в ревербераційній камері після перегородки.

Об'єм камери повинен бути не менше  $50 \text{ м}^3$ , вимірювальні точки (три для частот понад 500 Гц і шість нижче її) повинні знаходитися на відстані не менше 1 м від огорожувальних поверхонь камери і не менше  $A/5$  від джерела шуму. Вимірювання ведуть в октавних або третинооктавних смугах частот в діапазоні 100...3150 Гц. Рівні вимірюють шумоміром із смуговими фільтрами. Середній

рівень для кожної смуги визначається як середнє арифметичне із значень, виміряних у всіх точках [3].

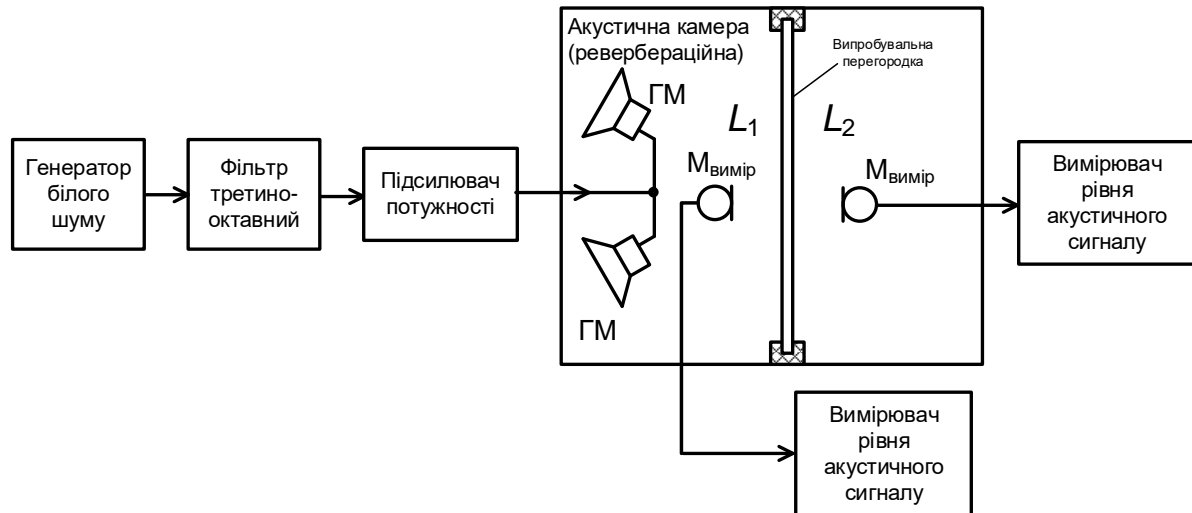


Рисунок 2.4 – Структурна схема макету з вимірювання звукоізоляції перегородок

### Вимірювання звукоізоляції приміщень

В цьому випадку досить виміряти рівень шуму поза приміщенням і всередині його в декількох точках. Звукоізоляція визначається як

$$\sigma = L_1 - L_2.$$

### Вимірювання акустичних шумів, сигналів і їх аналіз

За допомогою шумоміра вимірюють орієнтовне значення рівня гучності шуму при використанні найбільш імовірною шкали. Після цього встановлюють перемикач на шкалу, відповідну отриманому рівню, і знову вимірюють рівень гучності. При необхідності включають смугові фільтри і вимірюють рівень інтенсивності в кожній із смуг (шкала С). Вимірювання проводять для тієї постійної часу, яка задана за технічними умовами [3].

Для визначення відповідності шумів санітарним нормам за рівнем звуку його вимірюють шумоміром. Дані відраховують в децибелах за шкалою А (дБА). Відповідність за спектром визначають шляхом вимірювання рівнів звукового тиску в децибелах за шкалою С (дБС) в октавних смугах із середніми геометричними частотами: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Постійна часу шумоміра повинна бути в положенні «Швидко». АЧХ фільтрів А, В, С наведені на рис. 2.8.

Для спектрального аналізу різних сигналів застосовують третинооктавні фільтри із середніми геометричними частотами, що визначаються такою послідовністю чисел: 1; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,15; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00 і 10,0, що множиться на 10, 100, 1000, 10 000.

Амплітудний розподіл рівнів сигналів визначають за допомогою 12

порогових пристроїв, рівномірно розподілених за динамічним діапазонами 25, 50 або 75 дБ. Постійна часу береться рівною 200 мс для суб'єктивних оцінок або 20 мс для апаратурних цілей.

### **Особливості проведення досліджень в навчальній лабораторії з акустичною камерою**

Вимірювання акустичних параметрів, зокрема, часу реверберації, звукоізоляції, звукопоглинальних властивостей матеріалів тощо виконується в акустичній камері навчальної лабораторії та в самій навчальній лабораторії. Акустична камера являє собою закритий ящик невеликих розмірів, що є замкнутим повітряним об'ємом і у якому присутні резонанси повітряного об'єму на деяких частотах, що може приводити до неточних показань (див. розд.1). Хоча в остаточному результаті при виконанні лабораторних робіт на учбовому рівні важливо не точність вимірювань а уміння проводити дослідження і оцінювати результати, порівнюючи їх з теорією.

Акустична камера встановлена в навчальній лабораторії №215-Б кафедри звукотехніки та реєстрації інформації ФЕЛ. Розміри акустичної камери: висота  $h=2,8$  м; довжина  $l=2,28$  м; ширина  $b=1,78$  м. Площа підлоги камери  $S_{\text{п}} \approx 4,1$  м<sup>2</sup>, об'єм –  $V=11,4$  м<sup>3</sup>, загальна площа поверхонь  $S_{\Sigma} = 2lb+2hb+2lh = 2 \cdot 2,28 \cdot 1,78 + 2 \cdot 2,8 \cdot 1,78 + 2 \cdot 2,28 \cdot 2,8 = 30,9$  м<sup>2</sup>. В акустичній камері встановлені звукопоглинальні матеріали та конструкції, а також лабораторне обладнання, що враховується в процесі проведення акустичних вимірювань. Детальний опис звукопоглинальних матеріалів та конструкцій наведено у відповідній лабораторній роботі.

При проведенні лабораторних робіт в акустичній камері передбачається знаходження 2 студентів і, можливо, викладача, тобто загальна кількість людей в камері може бути 2...3 чоловіки. Відповідно до санітарних норм на одну людину в приміщенні студії повинно припадати площа не менше 1,8 м<sup>2</sup>, а об'єм – не менше 10 м<sup>3</sup>. За таких умов розміри приміщення не відповідають нормам, але проведення вимірювань, точніше, підготовчих робіт для вимірювання, наприклад, часу реверберації, або рівня звуку проводиться впродовж 10-15 хвилин, тому вибрані розміри задовольняють умовам проведення лабораторних робіт.

Вимірювання деяких акустичних параметрів, зокрема, часу реверберації та звукопоглинання окремих матеріалів проводиться також у навчальній лабораторії №215-Б кафедри ЗТ та РІ ФЕЛ. При проведенні вимірювань в самій лабораторії в ній можуть знаходитись студенти, кількістю до 25 осіб. Лабораторія має дві частини, що розділені перегородкою. Розміри лабораторії, в якій знаходяться студенти і де проводяться вимірювання акустичних параметрів такі: висота  $h=3,5$  м; довжина  $l=10,5$  м; ширина  $b=7,4$  м. Площа підлоги навчальної лабораторії  $S_{\text{п}} \approx 77,7$  м<sup>2</sup>, об'єм –  $V=271,95$  м<sup>3</sup>, загальна площа поверхонь  $S_{\Sigma} = 2lb+2hb+2lh = 2 \cdot 10,5 \cdot 7,4 + 2 \cdot 10,5 \cdot 3,5 + 2 \cdot 7,4 \cdot 3,5 = 280,7$  м<sup>2</sup>. В лабораторії встановлені меблі,



лабораторне обладнання тощо, що характеризуються звукопоглинальними властивостями. Детальний опис звукопоглинальних матеріалів та конструкцій наведені у відповідній лабораторній роботі та у додатку.

При вимірюванні акустичних параметрів приміщень серед пристроїв, що застосовуються для дослідження акустичних характеристик приміщення застосовуються такі прилади: звукова колонка; конденсаторний або динамічний мікрофон, мікшерний пульти, професійний аудіоаналізатор РАА3, спеціалізований вимірювач шумів, генератор тестових сигналів, мілівольтметр, персональний комп'ютер з необхідним програмним забезпеченням. Параметри мікрофонів та гучномовців, що застосовуються у лабораторних роботах наведені у додатках А та Б.

В процесі проведення лабораторних робіт за допомогою гучномовця відтворюються тестові сигнали звукової частоти, що надходять від генератора тестових сигналів або ПК. Приймачем акустичних сигналів є незалежний вимірювальний мікрофон, що підключений до мікрофонного підсилювача мікшерного пульта стану або(і) мікрофон спеціалізованого аудіоаналізатора РАА3. Вихід мікшерного пульта підключений до стандартних вимірювальних приладів – вольтметра, осцилографа, аналізатора спектру, персонального комп'ютера тощо. Аудіоаналізатор РАА3 має свій багатофункціональний дисплей, на якому відображаються значення вимірюваних параметрів. Узагальнена структурна схема лабораторного обладнання для вимірювання акустичних параметрів приміщень наведена на рис. 2.5.

Змінюючи умови вимірювань та вимірювальні прилади створюються різні лабораторні стенди, в залежності від цілей проведених досліджень.

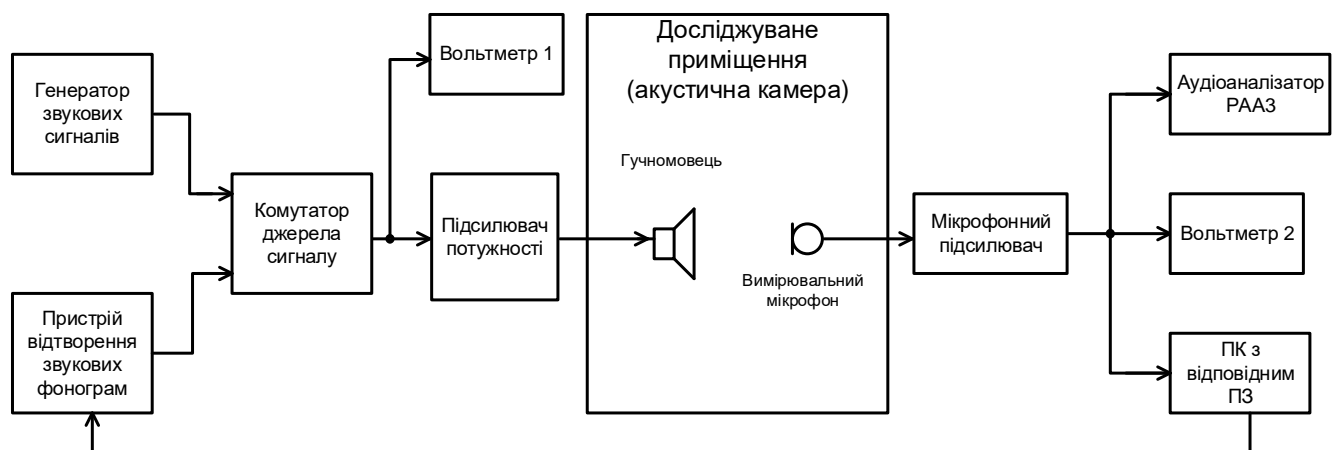


Рисунок 2.5 – Структурна схема обладнання для вимірювання акустичних характеристик приміщень

При вимірюванні АЧХ звуковідтворення у приміщенні, змінюючи частоту сигналу, вимірюються рівні сигналів на відповідних частотах та будується частотна характеристика приміщення. Результати порівнюються між собою та

теоретичними даними.

Час реверберації акустичної камери без додаткових звукопоглинальних матеріалів у діапазоні частот 125...4000 Гц складає у середньому 0,2 с. орієнтовна частотна залежність часу реверберації акустичної камери наведена на рис. 2.6.

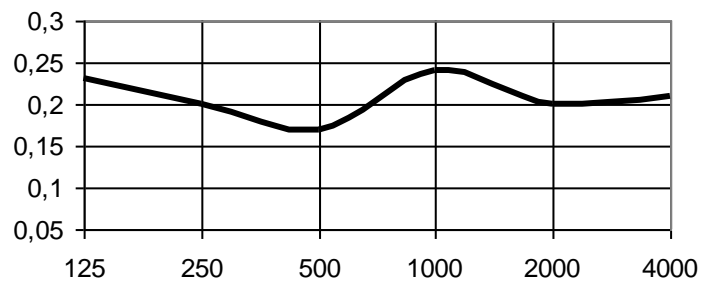


Рисунок 2.6 – Орієнтовна частотна залежність часу реверберації в акустичній камері

Нерівномірність часу реверберації у камері, як і нерівномірність частотної характеристики звуковідтворення, визначається, в першу чергу, наявністю резонансів закритого об'єму повітря акустичної камери, відповідно хвильовій теорії структури звукового поля приміщення.

Рівень сторонніх шумів, що проникають в акустичну камеру з навчальної лабораторії при знаходженні в останній групи студентів складає приблизно 40 дБ.

### Опис професійного аудіоаналізатора РАА3

Для об'єктивного вимірювання характеристик звукових акустичних сигналів застосовується вимірювальний пристрій – аналізатор звукових сигналів Phonic PAA-3 (рис. 2.7) [16].

Phonic PAA3 (Personal Audio Assistant) – високоточний аудіо аналізатор, який має всі необхідні інструменти, щоб налаштувати будь-яку акустичну аудіосистему.

Phonic PAA-3 – це аналізатор спектру, що працює в реальному часі і забезпечує вимірювання звукового тиску, має можливість вимірювання часу реверберації. Прилад оснащений вимірювальним мікрофоном, внутрішнім калібратором, вбудованим генератором рожевого шуму, синусоїдального сигналу частотою 1 кГц і полярного сигналу. В пристрої передбачено вбудований блок живлення: 4 батареї АА, пам'ять на 16 комірок, USB порт для підключення до ПК, функцію обчислення усередненого значення. Пристрій забезпечує вимірювання звукового сигналу в діапазоні від 20 до 20000 Гц, тривалість роботи батарей: 7 годин.

Всі функції і меню приладу стають легкодоступними, за допомогою всього трьох ергономічних клавіш. За допомогою USB порту є можливість зберегти або завантажити інформацію до або з комп'ютера.

Великий РК дисплей має підсвічування, яке можна включити при роботі в затемнених приміщеннях.

***Технічні особливості пристрою:***

- 31-смуговий аналізатор спектра;
- вбудований калібратор вимірювального мікрофона;
- вимірювач рівня звукового тиску від 30 дБ до 130 дБ;
- вимірювання лінійного сигналу відображається в dBu, dBV або вольтах;
- наявність фільтрів А-, С-зважування та Flat;
- вибір діапазону рівня сигналів;
- лінійний діапазон вимірювання сигналу: dBu - -50 ... + 40 dBu, dBV - -52 ... + 38 dBV, напруги 5 mV ... + 80 V;
- утримання максимального (пікового) рівня на дисплеї;
- 4 стандартних час відгуку: 35 мс, 125 мс (F), 250 мс (M), 1 сек (S)
- 10 комірок пам'яті для вимірювання і 6 для обчислення середнього значення параметра;
- 31-смуговий індикатор рівня налаштування еквайзера (підсилення / зріз)
- 160 x 160 графічний дисплей з підсвічуванням і регулюванням контрасту;
- перевірка фазування сигналів;
- вимірювання часу реверберації (RT60);
- наявність генератора рожевого шуму, синусоїди 1 кГц і тестового сигналу полярності, симетричний вихід;
- USB порт зв'язку, для одночасної роботи через ноутбук або ПК;
- Живлення від 4 елементів АА або від адаптера мережі 220 В, 50 Гц;
- 3 режиму живлення: (1) Режим енергозбереження: автоматичне відключення: коли жодна з кнопок не натискали протягом 15 хвилин, (2) Ручний, (3) Вимкнений.

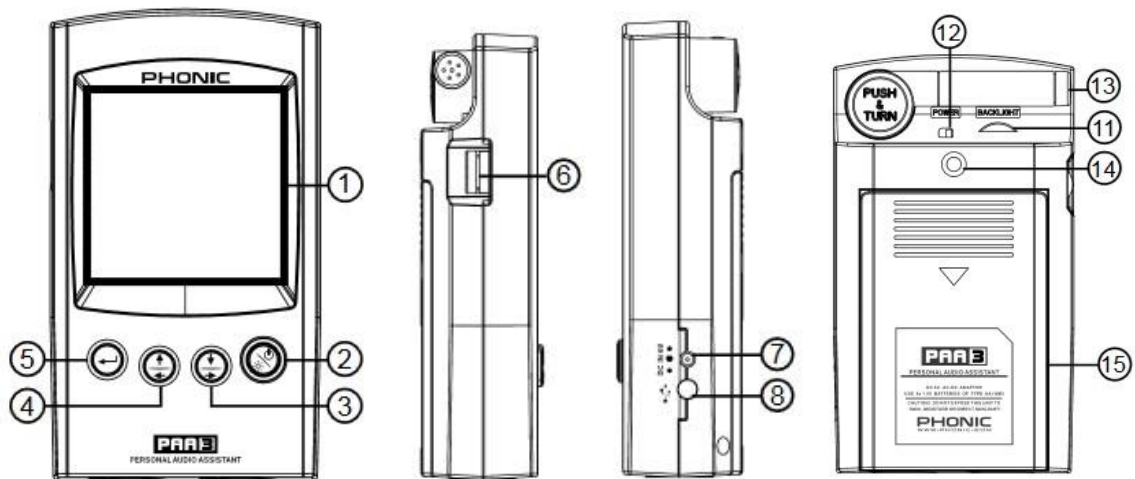
***Характеристики:***

Вимірювач рівня звукового тиску (SPL). Для вимірювання SPL можна використовувати мікрофон, який автоматично налаштовується на один з восьми передбачених діапазонів чутливості (35 дБ, 50 дБ, 60 дБ, 70 дБ, 80 дБ, 90 дБ, 100 дБ і 130 дБ). На дисплеї значення відображаються як у вигляді числових значень з кроком 0,1 дБ, так і у вигляді горизонтальної шкали з можливістю показу максимального зафіксованого значення. У режимі SPL можна виміряти рівень сигналу (від -20 дБ до 36 дБ), а також вхідну напругу (від 0 В до 50 В) лінійних входів, наприклад мікшерного пульта.

Аналізатор спектру в режимі реального часу (RTA). В основі аналізатора спектра лежить складний FFT-алгоритм, за допомогою якого обчислюється розподіл енергії за частотним спектром. Аудіоспектр оцінюється в цілому у діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц і відображається на дисплеї як 31-смуговий спектроаналізатор. Отримані результати можна зберегти в пам'яті і при необхідності перенести до комп'ютера.



а



б

Рисунок 2.7 - Загальний вигляд вимірювального приладу Phonic PAA-3 (а), розташування органів керування (б)

Усереднене значення (Average). Функція Average дозволяє обчислити середнє значення показників записаних в комірки пам'яті.

Тестер з'єднувальних кабелів (Cable Test). Режим Cable Test дозволяє перевірити розпаювання кабелів з рознімачами XLR. На дисплеї при тестуванні відображається який контакт одного кінця кабелю з яким контактом іншого кінця кабелю з'єднані між собою.

Пам'ять (Memory). Вбудована пам'ять має 16 комірок, з яких 10 для режиму RTA, а решта 6 комірок служать для функції Average. Пам'ять не має окремого живлення, з цього при відключенні від АС-адаптера або від батареї, пам'ять обнуляється. Всі дані пам'яті можуть бути скинуті на ПК, для цього є спеціальний перехідник з рознімачем RS-232.

Фазова перевірка (Phase Check). За допомогою цієї функції можна визначити полярність гучномовців. Мікрофон направляє на випробуваний гучномовець, і в залежності від його приєднання на екрані відображається "+" або символ "-", що свідчить про позитивну або негативну полярність гучномовця відповідно.

Для вимірювання часу реверберації у приладі передбачений режим RT60 із можливістю тимчасового зберігання результатів вимірювання і визначенням середнього часу реверберації.

Пристрій РААЗ дозволяє проводити вимірювання параметрів акустичного сигналу, включаючи час реверберації приміщення, використовуючи 3 типи зважування (три типи фільтрування звукового сигналу): тип А – для низьких рівнів звукового тиску; тип С – для високих рівнів; тип Flat – лінійне зважування.

Для роботи з аналізатором необхідно встановити елементи живлення у слот 15 (рис. 2.7, б) (4 батарейки типорозміром АА) або підключити мережевий адаптер до рознімача 7, натиснути і повернути на необхідний кут мікрофон вимірювача (13, рис. 2.7, б), перевести вимикач живлення 12 у положення «ON». Після цього натиснути кнопку 2 і утримуючи декілька секунд дочекатися включення приладу. При цьому на екрані з'явиться вікно режиму вимірювання спектру та рівня акустичного сигналу, тобто прилад перейде у режим аналізатора спектру (RTA (Real Time Analyzer) – спектральний аналізатор у реальному часі).

Для зміни вимірюваного параметра та налаштувань вимірювань необхідно за допомогою кнопок "ENTER", вліво/вгору і вправо/вниз (кнопки 2...5 на рис. 2.7, б) обрати відповідний режим роботи приладу та налаштування. Для збереження даних перейдіть в меню STORE. Для виходу переміщуйте курсор, доки він не встановиться на кнопку "ESC". Натисніть "ENTER" для виходу з відповідного режиму.

Налаштування часу інтеграції (часу відгуку) варіюється в залежності від цілей вимірювання. Можна задати наступні значення: 35 мс: надзвичайно швидкий (для вибухового звуку); 125 мс (F): швидкий; 250 мс (M): середній; 1 сек (S): повільний.

Пристрій РААЗ дозволяє проводити вимірювання, використовуючи 3 типи зважування (три смуги пропускання у частотному звуковому діапазоні: тип А – для низьких рівнів звукового тиску частотна характеристика має значне спадання рівня на НЧ і ВЧ частотах; тип С – для високих рівнів, частотна характеристика більш лінійна і має незначне спадання на НЧ і ВЧ; тип Flat – лінійне зважування, частотна характеристика лінійна у звуковому діапазоні з відхиленням -3 дБ. На рис. 2.8 відображено різні типи зважування: синім – А, червоним – С.

Застосування того або іншого фільтру визначається умовами вимірювання і може призвести до різних результатів вимірювань, особливо при досяганні пікового рівня.

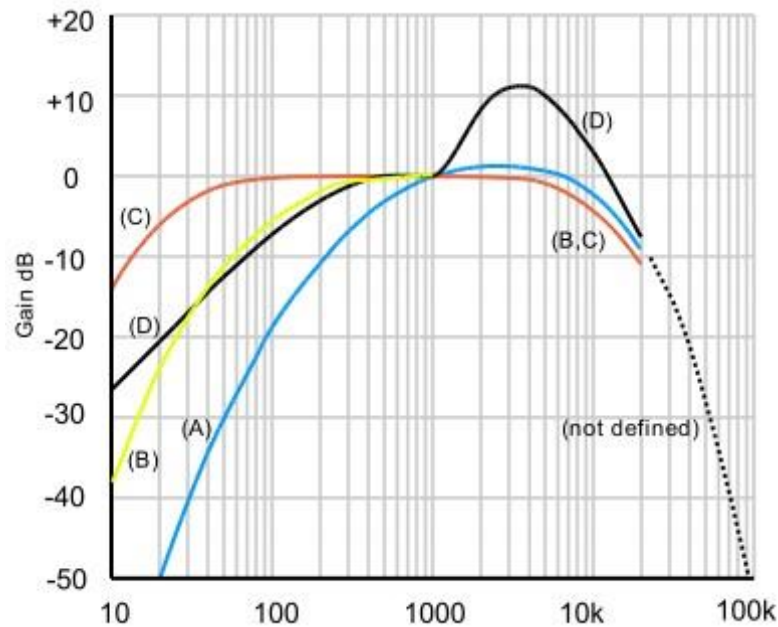


Рисунок 2.8 – Криві зважування

### Вимірювання спектральних характеристик акустичного сигналу

Ця функція аналізує звуковий акустичний сигнал, що приймається вбудованим мікрофоном, або звуковий сигнал, що подається на лінійний вхід приладу. Аналіз спектру здійснюється у діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц третинооктавним 31-смуговим аналізатором з відображенням інформації у відповідних смугах за допомогою гістограми, яка показує рівень сигналу в дБ для кожної смуги. Вимірювання спектру можливе для трьох типів зважування (A, C та Flat) та для чотирьох значень часу інтеграції (тривалості відгуку): 35 мс, 125 мс, 250 мс, 1 сек.

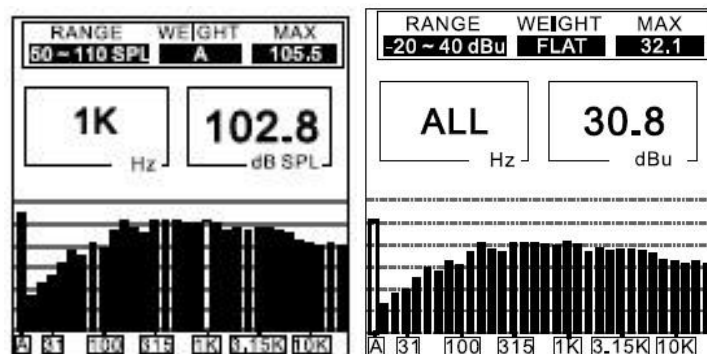


Рисунок 2.9 – Зображення дисплею у режимі спектроаналізатора акустичних сигналів

Для вимірювання спектру акустичного сигналу достатньо включити прилад, який після включення переходить у режим вимірювання спектру акустичного сигналу.

При необхідності зміни параметрів налаштування вимірювання, а саме, діапазону вимірювання рівня сигналів, фільтру зважування, часу інтеграції

необхідно перейти у меню налаштувань відповідних параметрів, а потім повернутися у режим RTA.

У режимі вимірювання спектру акустичного сигналу дисплей вимірювача відображає діапазон вимірювання рівня сигналів, фільтр зважування, максимальний рівень сигналу у смугах частот, сумарний рівень акустичного сигналу у всьому частотному діапазоні ALL.

Для визначення рівня сигналу у відповідній смузі (на відповідній частоті) можна обрати частоту за допомогою регулятора 6 (рис. 2.7, б). В цьому випадку на екрані буде зазначена частота, на якій проводиться вимірювання рівня сигналу. Наприклад на рис. 2.9 показано такі налаштування: діапазон рівня при 50 - 110 SPL, А-зважування, максимальний рівень звукового тиску під час вимірювання становить 105,5 дБ, а рівень на частоті 1 кГц в 102,8 дБ.

### Вимірювання рівня звукового тиску

Вимірювання рівня сигналу проводиться в децибелах (дБ) і здійснюється у режимі SPL.

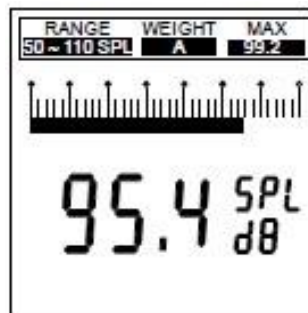


Рисунок 2.10 – Зображення дисплею у режимі вимірювача рівня звукового тиску

Для вимірювання рівня акустичного сигналу необхідно увійти у меню SPL/LINE та встановити режим SPL. В меню налаштувань обирається діапазон рівнів, фільтр зважування, час інтеграції вимірювача. На головному екрані RTA, утримуйте кнопку ENTER протягом приблизно 2 секунд, щоб активувати SPL екран. Натисніть кнопку ENTER один раз для виходу.

### Вимірювання часу реверберації

Для вимірювання часу реверберації за допомогою кнопки Enter (5 на рис. 2.7, б) обирається в головному меню режим "RT60". Прилад встановлюється у точку вимірювання часу реверберації і натискається «RUN» для запуску процесу вимірювання. Прилад переходить в режим моніторингу акустичних умов приміщення. Після моніторингу прилад переходить у режим очікування акустичного сигналу, рівень якого повинен бути більшим як мінімум на 30 дБ по відношенню до рівня шуму. Вимірювання починається при фіксації рівня сигналу

більше 30 дБ в порівнянні з рівнем фонового шуму (виявляється перед вимірюванням).

Запускається відтворення сигналу або шуму через звукову систему. Як тестові сигнали можуть бути плескання у долоні або пробій повітряної кульки, а також шумові або тональні частотно-модульовані сигнали з генераторів тестових сигналів. Після встановлення рівня сигналу більше 30 дБ по відношенню до початкового шуму раптово відключається звуковий тестовий сигнал. Прилад виконує відлік часу реверберації у приміщенні. Результат вимірювання буде відображатися на екрані (рис. 2.11).

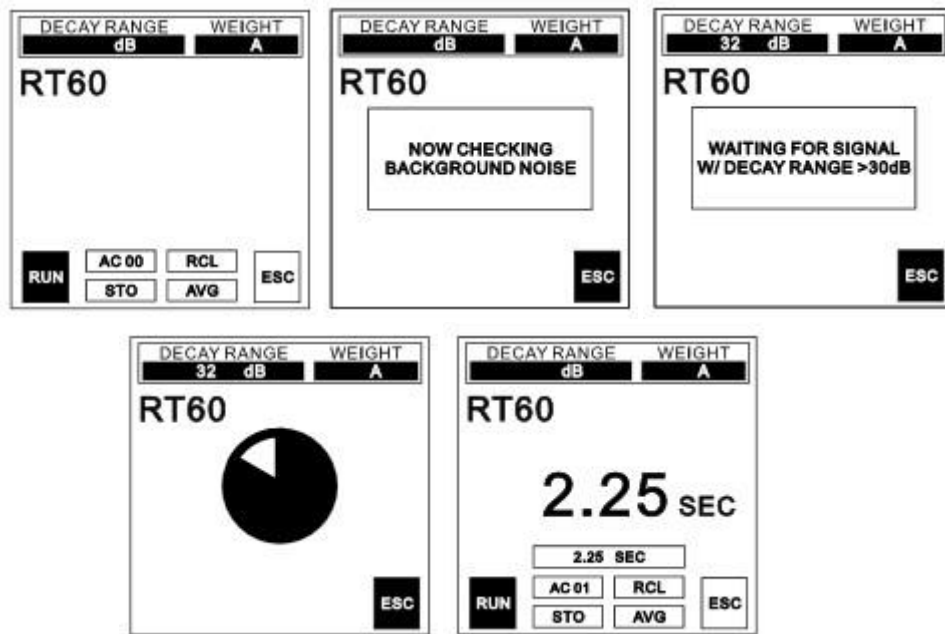


Рисунок 2.11 – Процес вимірювання часу реверберації



## Лабораторна робота №1

### *Вимірювання часу реверберації приміщень із застосуванням спеціалізованого вимірювача РААЗ*

**Мета роботи:** експериментально виміряти час реверберації приміщення, застосовуючи професійний аудіоаналізатор РААЗ у режимі вимірювання часу реверберації

### Опис роботи

В процесі виконання роботи вимірюється значення часу реверберації приміщення, власне, навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б. Як тестові сигнали застосовуються шумові та спеціалізовані тональні сигнали, що формуються генератором тестових сигналів, а також сигнали плескання у долоні. Як джерело (генератор) тестових сигналів застосовується персональний комп'ютер, у якому у програмному забезпеченні NUENDO створені необхідні тестові сигнали, а саме: тональні звуки різних частот, сигнали виючого тону, білий шум.

Результатом роботи є значення часу реверберації для приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери, а також частотна залежність часу реверберації у відповідному приміщенні.

Лабораторний стенд складається з:

- приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери в яких вимірюється час реверберації;
- генератора тестових сигналів або персонального комп'ютера з програмним забезпеченням NUENDO, в якому змодельовані тестові сигнали;
- активної звукової колонки "Samson Expedition Pro";
- вимірювача звукового тиску "РААЗ";

Схему стенда зображено на рис. Л1.1.

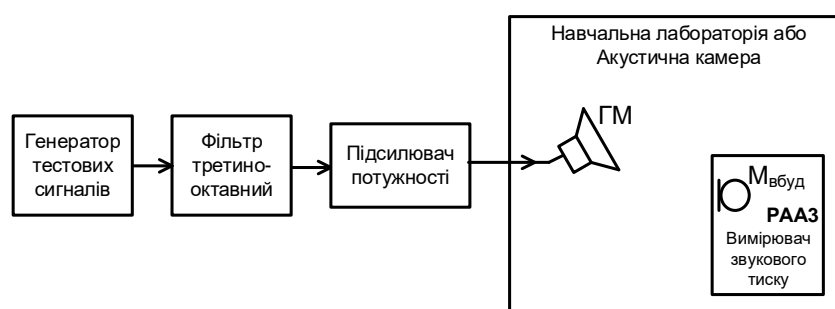
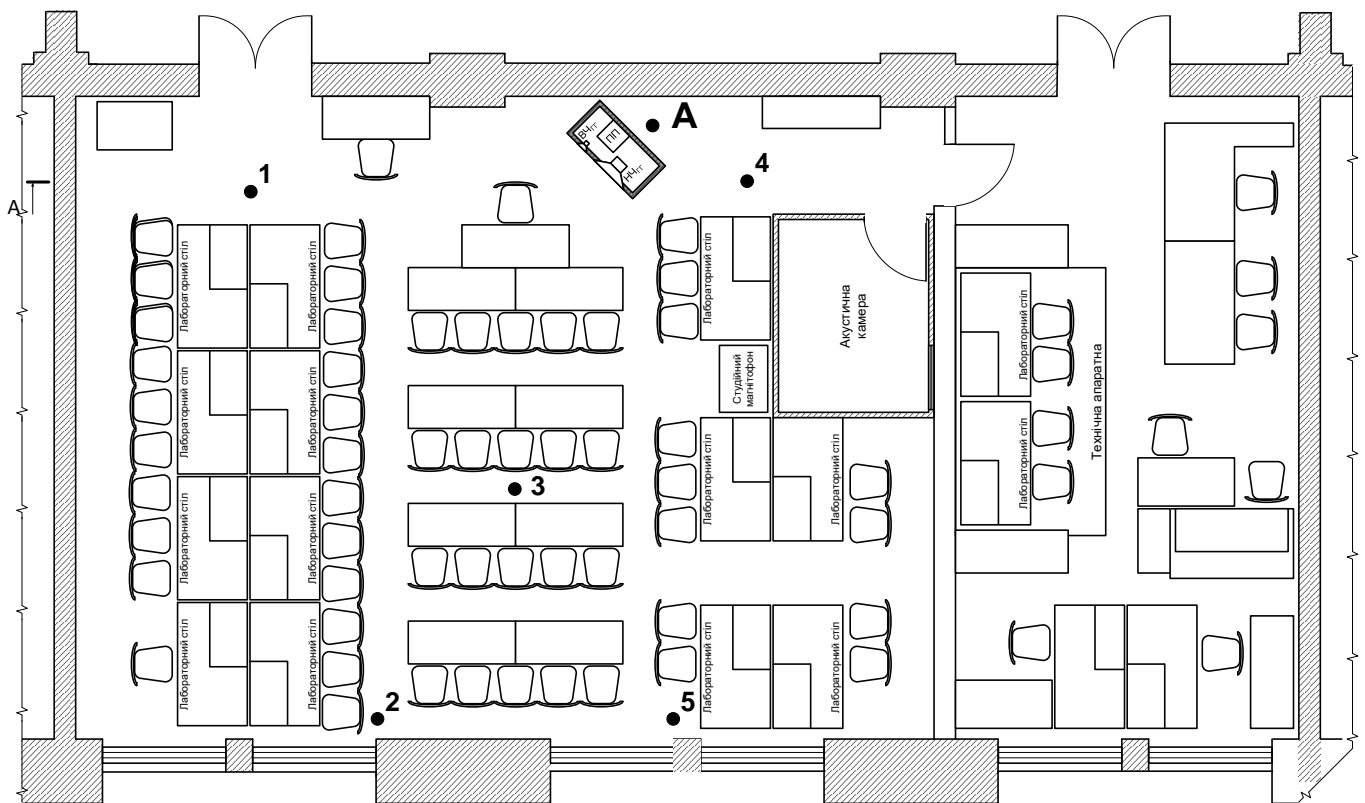


Рисунок Л1.1 - Схема лабораторного стенду

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись зі схемою лабораторного стенду та умовами вимірювання часу реверберації.
2. Перед включенням приладів встановити регулятори рівня сигналу на ГТС (або на ПК у ПЗ NUENDO 1 каналу) і на гучномовці у крайнє ліве положення.
3. Налаштувати вимірювач РААЗ на режим вимірювання рівня та спектру сигналу, а обладнання для відтворення звукових тестових сигналів у навчальній лабораторії. Гучномовець для відтворення тестових сигналів встановити в точку А (рис. Л1.2)
4. Включити живлення приладів і пристроїв стенду. Встановити частоту сигналу 1 кГц і за допомогою регуляторів рівня на ГТС (або ПК) і гучності на гучномовці налаштувати таку гучність гучномовця, що відповідає рівню 94 дБ ( звуковий тиск 1 Па). Вимірювання рівня звукового тиску проводити вимірювачем РААЗ на відстані 1 м від гучномовця.
5. Виміряти рівень сигналу на частоті 1 кГц у 5 точках приміщення (див. рис. Л1.2). Результати занести у табл. Л1.1.
6. Виключити тестовий сигнал та виміряти рівень акустичних шумів у тих же точках у лабораторії. Результати занести у табл. 1.
7. Налаштувати вимірювач РААЗ у режим вимірювання часу реверберації та перевірити працездатність.
8. Виміряти час реверберації у приміщенні навчальної лабораторії у 5 точках. Як тестовий сигнал вимірювання застосовувати хлопок у долоні. Вимірювання проводити у кожній точці тричі, а за результат вимірювання взяти середнє значення отриманих чисел часу реверберації.
9. Встановити вимірювач у центральну точку лабораторії (точка 3 на рис. Л1.2).
10. Включити вимірювач у режим вимірювання часу реверберації.  
Після аналізу приладом початкових умов у лабораторії включити тестовий сигнал частотою 125 Гц.  
Відтворювати тестовий сигнал впродовж часу, поки у приміщенні встановиться стала щільність звукового поля (орієнтовно 10-20 с після включення джерела) і відключити гучномовець.  
Прилад почне визначати час реверберації і на дисплеї буде відображено виміряне значення часу реверберації у секундах.
11. Повторити вимірювання, але частоти сигналів встановлювати 250 Гц, 50 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 4 кГц, білий шум.
12. Відповідно до отриманих результатів побудувати графік залежності часу реверберації від частоти сигналу.
13. Встановити вимірювальне та відтворювальне обладнання в акустичну камеру.
14. Виконати вимірювання часу реверберації в акустичній камері відповідно п.п. 4...13. Результати вимірювань занести у табл. Л1.2.



Таблиця Л1.1 – Результати вимірювань часу реверберації у лабораторії

[illegible]

Таблиця Л1.2 – Результати вимірювань часу реверберації в акустичній камері

	Плескання у долоні. Точки вимірювання	Тестові сигнали з частотами $f_{\text{т.сигн}}$ , Гц					
	1	125	250	500	1к	2к	4к
$L_c$ , дБ							
$L_{\text{ш}}$ , дБ							
$T_p$ , с							

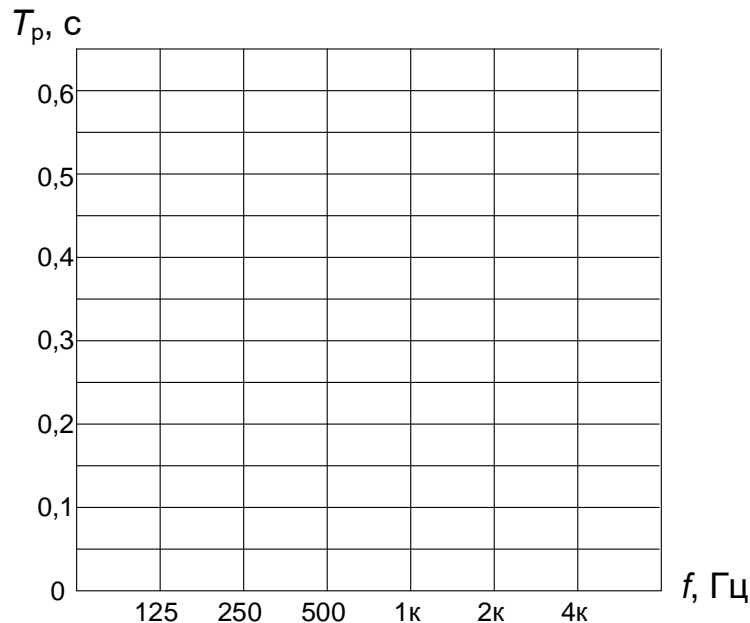


Рисунок Л1.3 – Графік для побудови залежності часу реверберації від частоти

Перед відключенням обладнання необхідно вивести у крайнє ліве положення регулятори рівня та гучності на ГТС і ГМ.

У звіті про лабораторну роботу привести:

- схему лабораторного стенду;
- узагальнений порядок виконання роботи;
- таблиці вимірних значень та графіки залежності часу реверберації для приміщень навчальної лабораторії й акустичної камери;
- опис отриманих акустичних параметрів, зокрема, виміряного часу реверберації та залежність його значення від частоти та від точки вимірювання;
- розрахунок часу реверберації для приміщення лабораторії та акустичної камери.

У звіті обов'язково зробити **висновок** про відповідність практичних результатів теоретичним положенням і суб'єктивну оцінку якості відтворення звукових тестових сигналів.

## Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику виконання вимірювань в контексті лабораторної роботи.
2. Пояснити значення отриманих результатів, що визначають отримані значення і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
3. Пояснити відмінність отриманих результатів з можливими теоретичними даними.
4. Зазначити які результати теоретично можливі для даних приміщень і чим вони визначаються.
5. Пояснити які умови у вимірюваних приміщеннях не відповідають необхідним для даного типу приміщень.
6. Зазначити та пояснити основні акустичні параметри приміщень різного призначення.
7. Зазначити та порівняти основні методики вимірювання часу реверберації у приміщенні.
8. Навести приклади тестових сигналів, що застосовуються для вимірювання часу реверберації і зазначити, які тестові сигнали застосовувались при виконанні роботи.
9. Зазначити придатність навчальної лабораторії з точки зору акустичних умов до проведення лекційних занять.

Література [1,2,3,8,9,13,16].

## Лабораторна робота №2

### *Вимірювання часу реверберації приміщення із застосуванням комп'ютерних технологій*

**Мета роботи:** експериментально виміряти час реверберації приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери, застосовуючи персональний комп'ютер у режимі відтворення тестових сигналів та запису звукового поля у приміщеннях.

### Опис роботи

В процесі виконання роботи вимірюється значення часу реверберації приміщення, власне, навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б. Як тестові сигнали застосовуються шумові та спеціалізовані тональні сигнали, що формуються генератором тестових сигналів. Як джерело (генератор) тестових сигналів застосовується персональний комп'ютер, у якому у програмному забезпеченні NUENDO створені необхідні

тестові сигнали, а саме: тональні звуки різних частот, сигнали виючого тону, білий шум.

Результатом роботи є значення часу реверберації для шумового сигналу та частотна залежність часу реверберації в акустичній камері.

Лабораторний стенд складається з:

- приміщень акустичної камери або навчальної лабораторії;
- персонального комп'ютера з змодельованими тестовими сигналами у ПЗ NUENDO;
- активної звукової колонки "Samson Expedition Pro"
- мікрофона "AKG D880";
- мікрофонного підсилювача;
- вимірювача звукового тиску "РАА3";
- вольтметра;
- осцилографа.

Схему стенда зображено на рис. Л2.1.

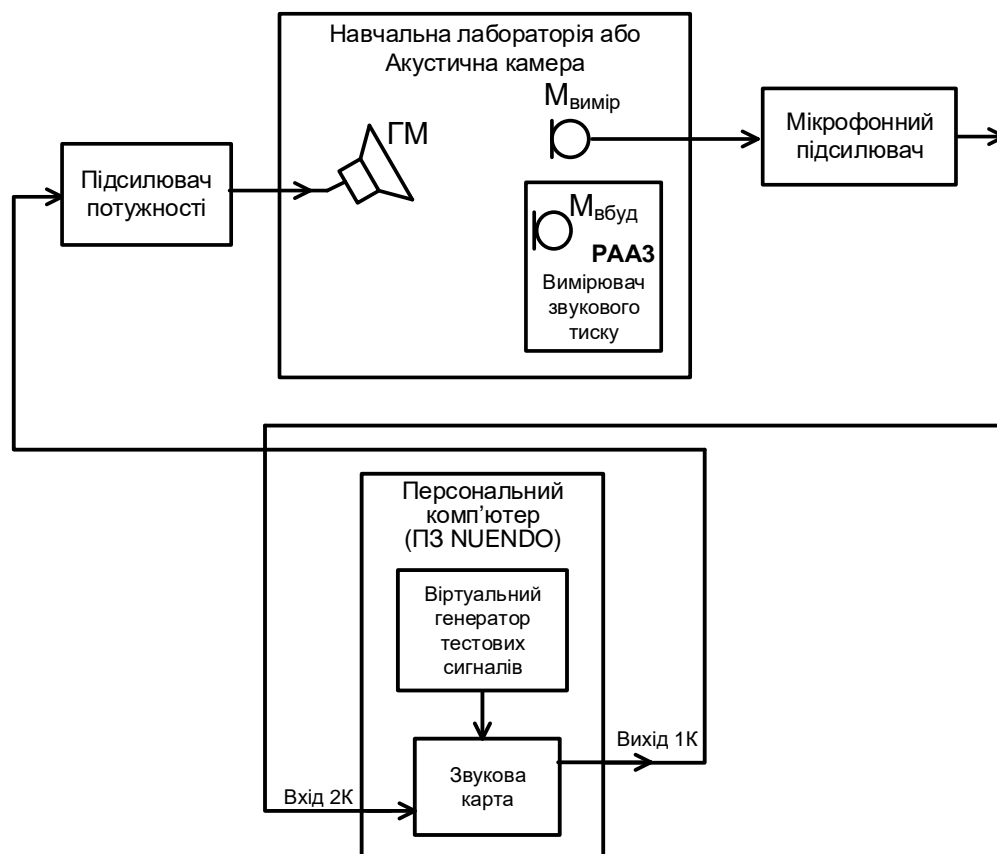


Рисунок Л2.1 - Схема лабораторного стенду

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись зі схемою лабораторного стенду та умовами вимірювання часу реверберації.
2. Перед включенням приладів встановити регулятори рівня сигналу на ГТС ПК і на гучномовці - активній звуковій колонці "Samson Expedition Pro" - у крайнє

ліве положення.

3. Налаштувати ПЗ NUENDO у режим відтворення послідовності тестових сигналів з 1 каналу й режим запису відтворених сигналів через вимірювальний мікрофон на 2 каналі. Обладнання встановити в навчальній лабораторії.
4. Включити живлення приладів і пристроїв стенду та у тестовому режимі відтворити сигнали. За допомогою регуляторів рівня на віртуальному ГТС ПК і гучності на гучномовці налаштувати таку гучність гучномовця, що відповідає рівню 94 дБ ( звуковий тиск 1 Па). Вимірювання рівня звукового тиску проводити вимірювачем PAA3 на відстані 1 м від гучномовця.
5. Включити ПЗ NUENDO у режим відтворення послідовності тестових сигналів з 1 каналу й режим запису відтворених сигналів через вимірювальний мікрофон на 2 каналі і виконати відтворення/запис.
6. Експортувати отриману фонограму у стереофонічну фонограму, на якій тестові сигнали відтворення вивести повністю у лівий канал, а записані сигнали з відображенням зменшення рівня звукового поля повністю у правий канал.
7. Відкрити отриманий файл звукової фонограми у ПЗ Sound Forge. Прослухати фонограму.
8. Виділити короткий фрагмент на записаній доріжці (правий канал) тривалістю до 1 с та відтворити цей фрагмент, фіксуючи рівень сигналу вбудованим вимірювачем рівня.
9. На ділянці фонограми, де явно видно спадання звукової енергії виділити короткий фрагмент до 1 с і виміряти рівень сигналу за допомогою вбудованого вимірювача рівня. Виділяючи по чергово короткі фрагменти на ділянці спадання звукової енергії знайти місце, в якому рівень сигналу буде на 30 дБ менше рівня, виміряного у п.8.
10. Виділяючи фрагмент між точкою, отриманою у п.9 та точкою, з якої починається спадання звукової енергії, отримаємо ділянку, що за часом буде визначати половину стандартного часу реверберації.
11. Повторити визначення ділянки спадання звукової енергії на 30 дБ для кожної тестової частоти і шумового сигналу, вимірюємо час реверберації для відповідної частоти. Результати заносимо у табл. Л2.1.
12. Відповідно до отриманих результатів побудувати графік залежності часу реверберації від частоти сигналу.
13. Встановити вимірювальне та відтворювальне обладнання в акустичну камеру.
14. Виконати вимірювання часу реверберації в акустичній камері відповідно п.п. 4...12. Результати вимірювань занести у табл. Л2.2.
14. У висновках навести та пояснити відмінності отриманої характеристики від теоретичної.

Таблиця Л2.1 – Результати вимірювань часу реверберації у лабораторії

	Тестові сигнали з частотами $f_{\text{т.сигн}}$ , Гц						
	125	250	500	1к	2к	4к	Шум
$T_p$ , с							

Таблиця Л2.2 – Результати вимірювань часу реверберації в акустичній камері

	Тестові сигнали з частотами $f_{\text{т.сигн}}$ , Гц						
	125	250	500	1к	2к	4к	Шум
$T_p$ , с							

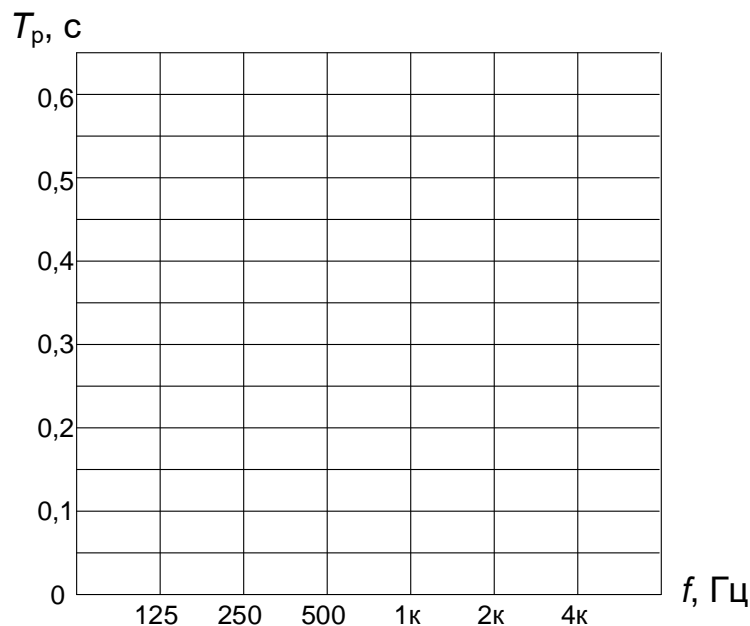


Рисунок Л2.2 – Графік для побудови залежності часу реверберації від частоти

Перед відключенням обладнання необхідно вивести у крайнє ліве положення регулятори рівня та гучності на ГТС ПК і ГМ.

У звіті про лабораторну роботу привести:

- схему лабораторного стенду;
- узагальнений порядок виконання роботи;
- таблиці вимірних значень та графіки залежності часу реверберації для приміщень навчальної лабораторії й акустичної камери;
- опис отриманих акустичних параметрів, зокрема, виміряного часу реверберації та залежність його значення від частоти та від точки вимірювання.

У звіті обов'язково зробити **висновок** про відповідність практичних результатів теоретичним положенням і суб'єктивну оцінку якості відтворення звукових тестових сигналів.



### Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику виконання вимірювань в контексті лабораторної роботи.
2. Пояснити значення отриманих результатів, що визначають отримані значення і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
3. Пояснити відмінність отриманих результатів з можливими теоретичними даними.
4. Зазначити які результати теоретично можливі для даних приміщень і чим вони визначаються.
5. Пояснити які умови у вимірюваних приміщеннях не відповідають необхідним для даного типу приміщень.
6. Зазначити та пояснити основні акустичні параметри приміщень різного призначення.
7. Зазначити та порівняти основні методики вимірювання часу реверберації у приміщенні.
8. Навести приклади тестових сигналів, що застосовуються для вимірювання часу реверберації і зазначити, які тестові сигнали застосовувались при виконанні роботи.
9. Зазначити придатність навчальної лабораторії з точки зору акустичних умов до проведення лекційних занять.

Література [1,2,3,8,9,12,13,14,15,16].

### Лабораторна робота №3

#### *Дослідження акустичного облаштування навчальної лабораторії та акустичної камери й розрахунок часу реверберації приміщень*

**Мета роботи:** експериментально дослідити акустичне облаштування приміщень із зазначенням поверхонь та матеріалів, що володіють звукопоглинальними властивостями та розрахувати час реверберації у приміщеннях

### Опис роботи

В процесі виконання роботи вимірюються і уточнюються розміри приміщення навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б, визначаються поверхні приміщення, матеріали та конструкції, а також об'єкти, що знаходяться у приміщенні навчальної лабораторії й акустичної камери, які володіють звукопоглинальними

властивостями, та розраховується час реверберації у приміщеннях.

В процесі визначення звукопоглинальних матеріалів, конструкцій та об'єктів вимірюються їх розміри або кількість, складається таблиця фонду звукопоглинання з зазначенням коефіцієнтів звукопоглинання та загального звукопоглинання (табл. ЛЗ.2), будується графік залежності звукопоглинання у приміщенні від частоти. За результатами табл.ЛЗ.1 розраховується частотна залежність часу реверберації для приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери та будується графік залежності часу реверберації від частоти.

Результатом роботи є розраховане значення часу реверберації для приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери, а також частотна залежність часу реверберації у відповідному приміщенні.

Лабораторний стенд складається з приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери, для яких визначаються звукопоглинальні матеріали та розраховується час реверберації, самих звукопоглинальних матеріалів, конструкцій та об'єктів, що розміщені в приміщеннях та засобів вимірювання розмірів й розрахунку необхідних параметрів.

Розміщення обладнання навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б з геометричними розмірами приміщень наведені на рис. ЛЗ.1.

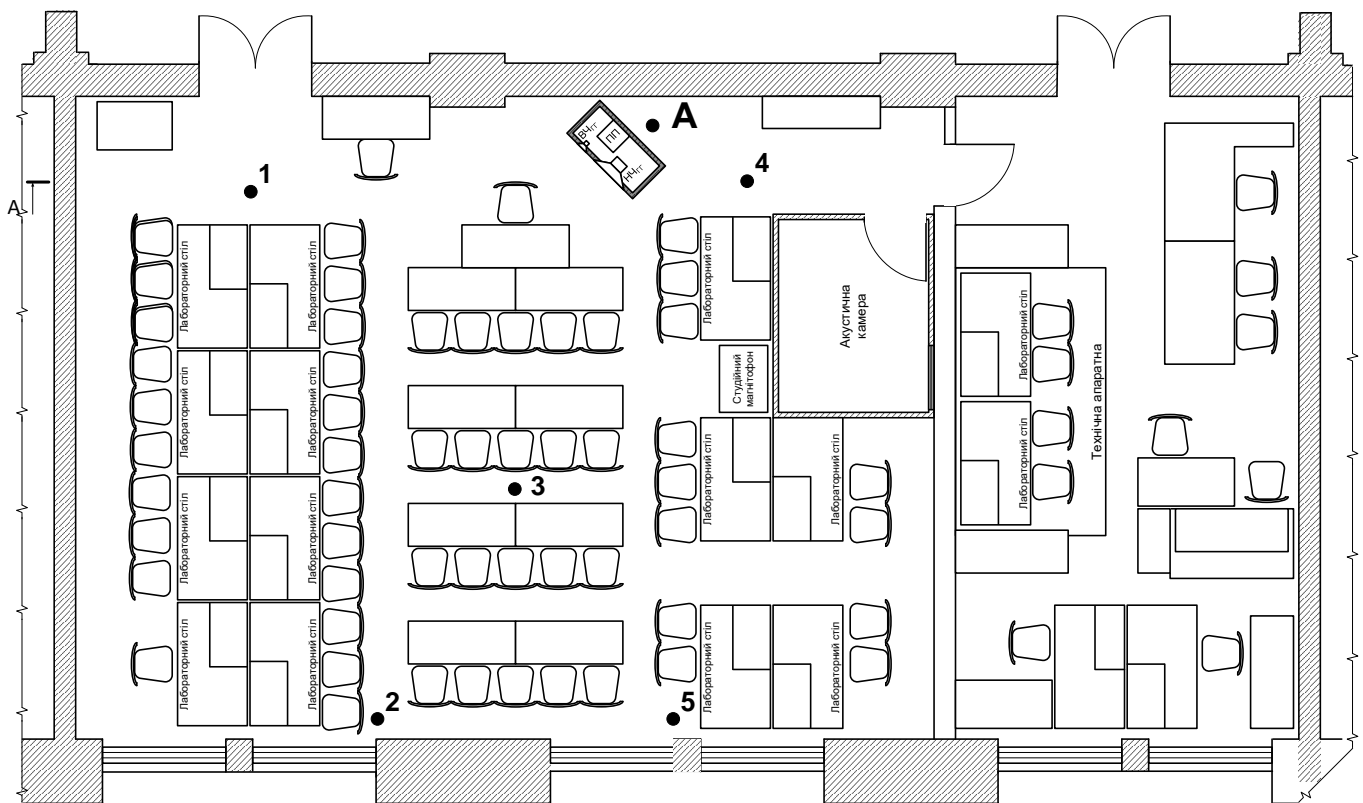


Рисунок ЛЗ.1 – План приміщення навчальної лабораторії №215-Б

## Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись із планом навчальної лабораторії та акустичної камери й уточнити розміри приміщень за допомогою рулетки. Результати визначення розмірів занести у таблицю ЛЗ.1.
2. Описати елементи облаштування приміщення й визначити поверхні, матеріали, предмети, об'єкти у приміщеннях, що володіють звукопоглинальними властивостями. Виміряти орієнтовно розміри, площі або кількість звукопоглинальних елементів. Результати занести у табл. ЛЗ.2-1 для навчальної лабораторії та табл. ЛЗ.2-2 для акустичної камери.
3. За результатами п.2 скласти табл. ЛЗ.3, в яку занести коефіцієнти звукопоглинання матеріалів. Коефіцієнти звукопоглинання окремих поверхонь та предметів, а також людей виписати з додатку В та методичних вказівок з виконання курсового проекту [4]. Для кожного матеріалу, предмету, поверхні розрахувати поглинання на відповідних частотах. Результати заносити у табл. ЛЗ.3-1 для навчальної лабораторії та табл. ЛЗ.3-2 для акустичної камери.
4. Розрахувати сумарний фонд звукопоглинання приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери. Результати занести у табл. ЛЗ.3-1, ЛЗ.3-2. Побудувати графіки частотної залежності звукопоглинання у приміщеннях (рис. ЛЗ.2, *а* - для навчальної лабораторії та *б* - для акустичної камери)
5. Розрахувати час реверберації у приміщенні навчальної лабораторії та акустичної камери. Результати занести у табл. ЛЗ.3-1 та ЛЗ.3-2. Побудувати графіки частотної залежності часу реверберації у приміщеннях (рис. ЛЗ.3)
6. У висновках навести та пояснити відмінності отриманого розрахованого значення часу реверберації від виміряного у ЛР №1 та 2..

Таблиця ЛЗ.1 – Параметри приміщення

Параметр	Позначення	Значення	
		Навчальна лабораторія	Акустична камера
Довжина приміщення, м	$l$		
Ширина приміщення, м	$b$		
Висота приміщення, м	$h$		
Об'єм приміщення, м <sup>3</sup>	$V$		
Площа поверхонь огороження, м <sup>2</sup>	$S_{\Sigma}$		
Двері	$S_{\text{Д}}$		
Вікна	$S_{\text{В}}$		

Таблиця ЛЗ.2-1 – Елементи облаштування приміщення **навчальної лабораторії**

	Поверхня	Матеріал	Площа, м <sup>2</sup> або кількість, шт.
1	Стіни	Цегляні із штукатуркою, пофарбовані масляною фарбою	
2	Підлога	Паркет	
3	Стеля	Залізобетонна із штукатуркою, пофарбована	
4	Вікна	Скло звичайне	
5	Двері	Металеві, оббиті дерматином із заповненням поролоном	
6	Стіл	ДСП	
7	Штори	Бархатні, що вільно звисають (щільність 0,6 кг/м <sup>2</sup> )	
8	Технічне обладнання	Вимірювальні прилади, гучномовці та інше	
9	Люди		
10	Крісла	Напівм'яке	
11	Стільці	Жорсткий	
12	Панелі ДСП	ДСП	
13	Панелі ДВП	ДВП на скловаті 50 мм	
14	Шафа	ДСП, скло	
15	Вагонка	Дерев'яна, соснова	
16			
17			
18			
19			
20			

Таблиця ЛЗ.2-2 – Елементи облаштування приміщення **акустичної камери**

	Поверхня	Матеріал	Площа, м <sup>2</sup> або кількість, шт.
1	Стіни	Вагонка дерев'яна на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
2		Лист ДСП 20 мм на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
3		Лист ДСП 20 мм вкритий ковроліном на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
4		Лист тисненого картону 10 мм на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
5		Пластикові вагонки 2 мм на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
2	Підлога	Ковролін на паркеті	
3	Стеля	Лист ДВП на дерев'яній обрешітці із заповненням скловатою	
4	Вікна	Склопакет 5-16-5 на гумових прокладках	
5	Двері	Звичайні фільтрчасті із ДВП, з внутрішньої сторони оббиті дерматином із заповненням поролоном 20 мм	
6	Стіл	ДСП	
7	Технічне обладнання	Вимірювальні прилади, гучномовці та інше	
8	Люди		
9	Стільці	Жорсткий	
10			
11			
12			



[illegible]

Поглинання звуку в повітрі ( $4\mu V$ )													
Розрахований час реверберації $T_{\text{розра}}$													
Вимірний час реверберації $T_{\text{вим}}$													
Відхилення $T_{\text{розра}} - T_{\text{вим}}$													
Відхилення $\delta$ , %													

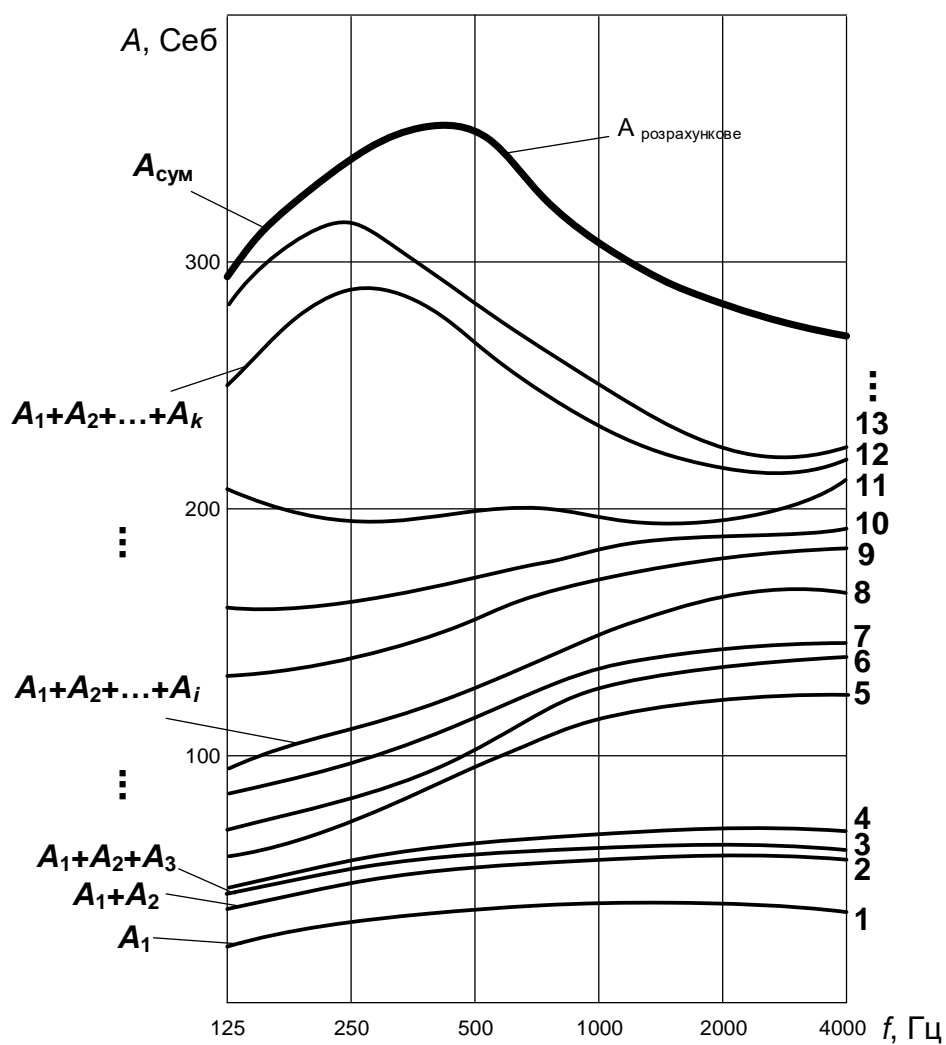


Рисунок Л3.2 – Приклад відображення звукопоглинання у приміщенні в залежності від частоти



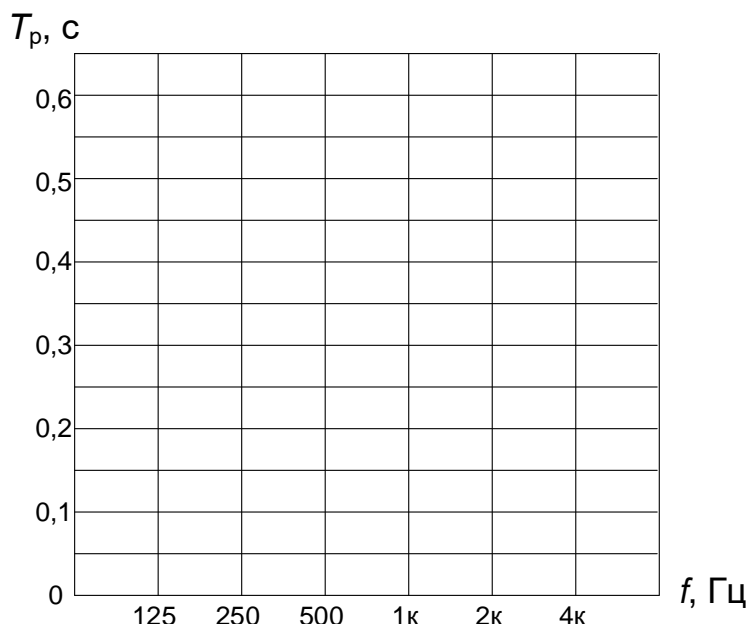


Рисунок ЛЗ.3 – Графік для побудови залежності часу реверберації від частоти (крива 1 – для навчальної лабораторії, крива 2 – для акустичної камери)

У звіті про лабораторну роботу привести:

- план лабораторії та акустичної камери із зазначенням розмірів матеріалів та об'єктів, що володіють звукопоглинальними властивостями;
- узагальнений порядок виконання роботи та методику розрахунку часу реверберації для приміщень;
- таблиці визначених та розрахованих значень та графіки частотної залежності звукопоглинання й часу реверберації для приміщень навчальної лабораторії й акустичної камери.

У звіті обов'язково зробити **висновок** про відповідність розрахованих значень параметрів теоретичним положенням та вимірним значенням.

### Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику виконання розрахунків в контексті лабораторної роботи.
2. Пояснити значення отриманих результатів, що визначають отримані значення і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
3. Пояснити відмінність отриманих результатів з можливими теоретичними даними та вимірними значеннями часу реверберації у попередніх роботах.
4. Зазначити які матеріали у приміщенні лабораторії володіють звукопоглинальними властивостями.
5. Пояснити які узагальнення можна припустити у визначенні звукопоглинальних властивостей матеріалів.
6. Зазначити та пояснити основні акустичні параметри приміщень різного

призначення.

7. Зазначити та порівняти основні методики визначення часу реверберації у приміщенні.

8. Навести приклади звукопоглиначів, які спроможні суттєво змінити час реверберації у приміщенні.

9. Зазначити придатність навчальної лабораторії з точки зору акустичних умов до проведення лекційних занять.

Література [1,2,3,4,5].

## Лабораторна робота №4

### *Дослідження звукоізоляції огорожень приміщення*

**Мета роботи:** експериментально дослідити шуми, що проникають у навчальну лабораторію й у акустичну камеру та виміряти значення власної звукоізоляції огорожень приміщень

### Опис роботи

В процесі виконання роботи досліджуються конструктивні особливості огорожень приміщення, вимірюються значення рівнів шумів, що проходять у навчальну лабораторію із суміжних приміщень при визначених значеннях рівня звукового поля у суміжних приміщеннях та розраховується значення власної звукоізоляції стін навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б. Як тестові сигнали застосовуються шумові та тональні сигнали, що формуються генератором тестових сигналів, а також джерелами натурального звучання. Як джерела тестових сигналів застосовуються натуральні звуки вулиці, суміжних приміщень, а також як генератор тестових сигналів використовується персональний комп'ютер, у якому у програмному забезпеченні NUENDO створені необхідні тестові сигнали, а саме: тональні звуки різних частот, сигнали виючого тону, білий шум.

Результатом роботи є значення власної звукоізоляції для широкосмугового шумового сигналу та частотна залежність власної звукоізоляції огорожень акустичної камери.

Лабораторний стенд складається з:

- приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери в яких вимірюється рівень шумів та власна звукоізоляція огорожень;
- генератора тестових сигналів (ГТС) або персонального комп'ютера (ПК) з програмним забезпеченням (ПЗ) NUENDO, в якому змодельовані тестові сигнали;

- гучномовця (ГМ) - активної звукової колонки (ЗК) "Samson Expedition Pro";
  - вимірювача звукового тиску "РАА3" та вимірювача рівня шуму "GM1356";
- Схему стенда зображено на рис. Л4.1.

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись зі схемою лабораторного стенду та умовами вимірювання звукоізоляції приміщень.
2. Перед включенням приладів встановити регулятори рівня сигналу на ГТС (або на ПК у ПЗ NUENDO 1 каналу) і на гучномовці (ЗК) у крайнє ліве положення.
3. Налаштувати вимірювач РАА3 на режим вимірювання рівня та спектру сигналу, а обладнання для відтворення звукових тестових сигналів у акустичній камері. Звернути увагу на смугу частот, в якій вимірюється рівень звукового сигналу, що визначається типом фільтру А, або С, або з наскрізною широкою смугою (Flat). Гучномовець для відтворення тестових сигналів встановити у акустичну камеру (рис. Л4.1).

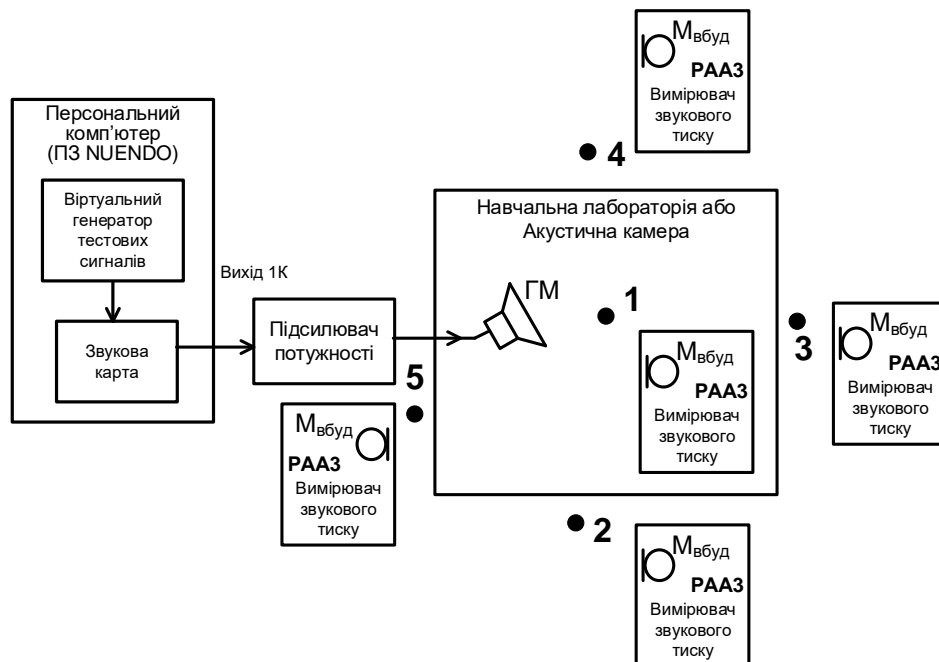


Рисунок Л4.1 - Схема лабораторного стенду

4. При відключеному гучномовці та за умови максимальної тиші у лабораторії застосовуючи вимірювач РАА3 виміряти рівень та спектр шумів у точках приміщення 1...11 (рис. Л4.2) у смузі частот, що визначається фільтром А. Результати вимірювань занести у таблицю 4.1. Вимірювання рівня у точках 2...5 проводити на відстані приблизно 0,5 м від стінки акустичної камери, посередині стінки. Спектр сигналу фіксувати (фотографувати) лише у точках 1, 6, 8 і «вклеїти» у протокол.
5. Змінити фільтр на С і виміряти рівень та спектр сигналів у тих же точках. Результати вимірювань занести у таблицю Л4.1.

6. Виконати вимірювання рівня шуму у точках 1...11, застосовуючи вимірювач шуму GM1356, підключаючи на приладі для вимірювання відповідні фільтри (А та С). Результати вимірювань занести у таблицю Л4.1.
7. Включити живлення приладів і пристроїв стенду. Встановити на ГТС або ПК (ПЗ NUENDO) частоту сигналу 1 кГц і за допомогою регуляторів рівня на ГТС (або ПК) і гучності на гучномовці налаштувати таку гучність гучномовця, що відповідає рівню 94 дБ (звуковий тиск 1 Па). Вимірювання початкового рівня звукового тиску проводити вимірювачем РАА3 з фільтром А на відстані 1 м від гучномовця (точка 1 на рисунку Л4.1).
8. Виміряти рівень сигналу на частоті 1 кГц у точках 1...11 приміщення (див. рис. Л4.2). Результати занести у табл. Л4.2.
9. Включити як тестовий сигнал «білий» шум з рівнем у точці 1 акустичної камери 94 дБ (звуковий тиск 1 Па). Вимірювання заданого рівня звукового тиску проводити вимірювачем РАА3 на відстані 1 м від гучномовця.
10. Виміряти рівень сигналу «білого» шуму у точках 1...11 приміщення (див. рис. Л4.2). Результати вимірювань занести у табл. Л4.2.
11. Визначити власну звукоізоляцію стінок акустичної камери на різних частотах. Для цього виміряти рівні тестових сигналів у точках 1...5. Як тестові сигнали використовувати сигнал «білого» шуму та тональні сигнали з частотами: 63; 125; 500 Гц; 1; 4; 10; 15 кГц.  
Власна звукоізоляція буде визначатися як різниця між рівнем сигналу всередині акустичної камери (точка 1), в якій встановлене умовне джерело шуму, та рівнем у відповідній точці 2...5 для різних тестових сигналів.
12. Вимірювання рівнів сигналів для визначення значення власної звукоізоляції перегородок виконується у такій послідовності:
  - а) встановлюється (наприклад, у ПЗ NUENDO на одній із доріжок) і відтворюється послідовність тестових сигналів у порядку: сигнал «Паузи» (відсутність сигналу); 63; 125; 500 Гц; 1; 4; 10; 15 кГц, «білий» шум. В режимі відтворення сигналу «паузи», по суті, вимірюється рівень шумів у визначених точках (точки 1...5) за допомогою вимірювача шумів GM1356 та аудіоаналізатора РАА3;
  - б) в процесі відтворення звукових тестових сигналів вимірюється їх рівень у відповідних точках (1...5). Значення рівня шуму у режимі відтворення «паузи» заносяться у табл. Л4.3;
  - в) результати вимірювань рівнів тестових звукових сигналів заносяться у табл. Л4.4;
  - г) в таблицю Л4.5 заносяться значення власної звукоізоляції перегородок;
  - д) відповідно до отриманих результатів будується графік залежності звукоізоляції перегородок від частоти сигналу.
13. У висновках навести та пояснити відмінності отриманих результатів вимірювань від теоретично розрахованих значень.



Таблиця Л4.2 – Результати вимірювань рівнів сигналів у навчальній лабораторії при відтворенні їх в акустичній камері

Прилад РААЗ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 кГц	$L_{ш-А}$ , дБ											
	$L_{ш-С}$ , дБ											
«Білий» шум	$L_{ш-А}$ , дБ											
	$L_{ш-С}$ , дБ											

Таблиця Л4.3 – Результати вимірювань рівня шумів у визначених точках при відключеному сигналі в акустичній камері

	Точка	Прилад РААЗ, фільтр А	Прилад РААЗ, фільтр С	Прилад GM1356, фільтр А	Прилад GM1356, фільтр С
$L_{ш}$ , дБ	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Таблиця Л4.4 – Результати вимірювань рівня сигналу у навчальній лабораторії при відтворенні в акустичній камері тестових сигналів

Прилад РААЗ	Точка	63 Гц	125 Гц	500 Гц	1 кГц	4 кГц	10 кГц	15 кГц	«Білий» шум
$L_{с-А}$ , дБ	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

Таблиця Л4.5 – Результати визначення значення власної звукоізоляції огорожень акустичної камери ( $\Delta L_{1-5} = L_{с1} - L_{сн}$ )

Власна звукоізоляція $\sigma$ , дБ	63 Гц	125 Гц	500 Гц	1 кГц	4 кГц	10 кГц	15 кГц	«Білий» шум
$\Delta L_{1-2}$								
$\Delta L_{1-3}$								
$\Delta L_{1-4}$								
$\Delta L_{1-5}$								

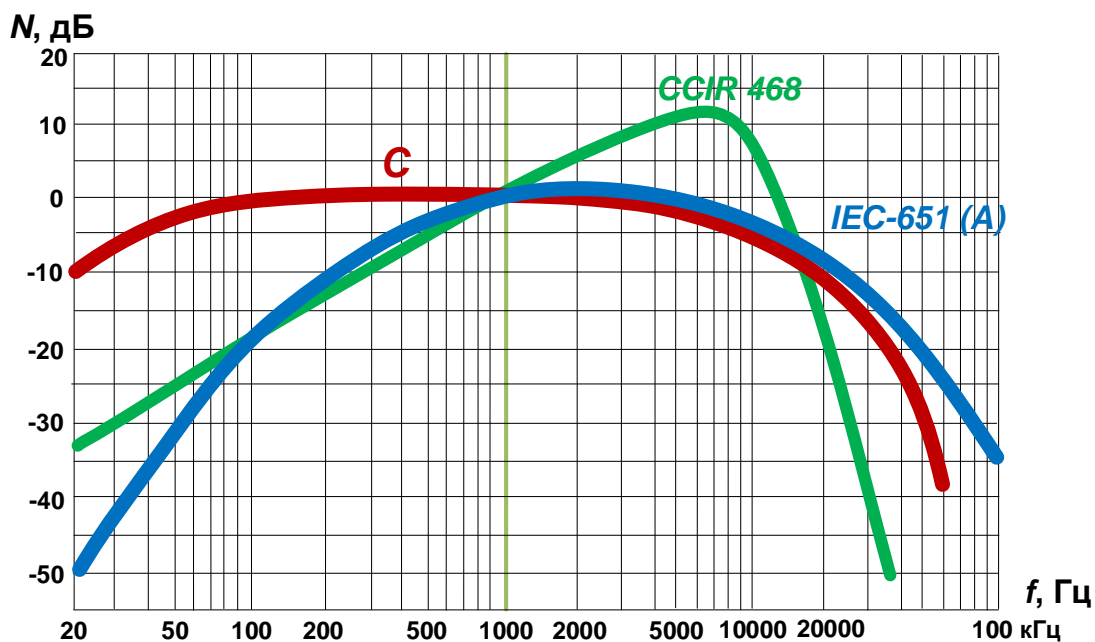


Рисунок Л4.3 – Частотні характеристики фільтрів для вимірювання рівнів звукового тиску

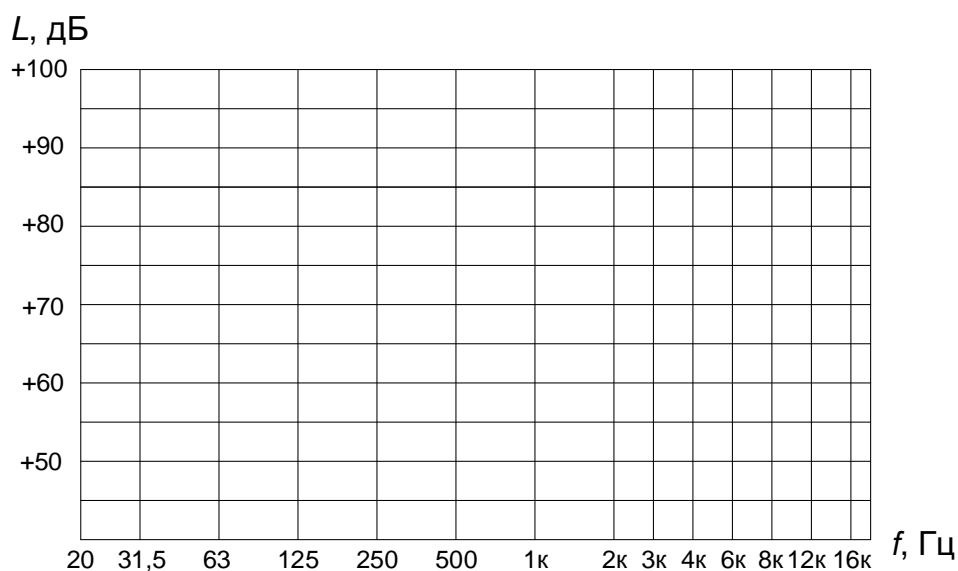


Рисунок Л4.4 – Графік для побудови залежності власної ізоляції огорожень приміщення акустичної камери від частоти

### Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику виконання вимірювань в контексті лабораторної роботи.
2. Пояснити значення отриманих результатів і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
3. Пояснити відмінність отриманих результатів з теоретичними розрахунками.
4. Зазначити які результати теоретично можливі для даних приміщень і чим вони визначаються.

5. Пояснити які умови з точки зору акустики у вимірюваних приміщеннях не відповідають необхідним для даного типу приміщень.
6. Зазначити та пояснити основні акустичні параметри приміщень різного призначення.
7. Зазначити та порівняти основні методики вимірювання рівня шумів у приміщеннях та звукоізоляції перегородок приміщення.
8. Зазначити придатність навчальної лабораторії з точки зору звукоізоляції до проведення лекційних занять.
9. Назвати будівельні, побутові, природні тощо матеріали, які володіють звукоізоляційними властивостями.
10. Пояснити вимоги до умов вимірювання звукоізоляції перегородок у приміщеннях.
11. Пояснити в чому відмінність вимірювання параметрів акустичного сигналу з різними фільтрами А, С.

Література [1,2,3,4,8,16].

### **Лабораторна робота №5**

#### ***Дослідження звукоізоляційних властивостей огорожень навчальної лабораторії та акустичної камери й розрахунок рівня шумів, що проникає у приміщення з навколишніх просторів***

**Мета роботи:** експериментально дослідити звукоізоляційні властивості огорожень приміщення та розрахувати рівень шумів, що проникає у приміщення з навколишніх просторів

#### **Опис роботи**

В процесі виконання роботи вимірюються і уточнюються розміри огорожень приміщення навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б, визначаються конструктивні особливості огорожень з точки зору звукоізоляційних властивостей, враховується фонд звукопоглинання у приміщеннях та розраховується рівень акустичного шуму, що надходить із суміжних приміщень у визначені приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери..

В процесі визначення конструктивних особливостей та звукоізоляційних властивостей огорожень приміщень вимірюються їх розміри, товщина, внутрішнє заповнення і складається таблиця огорожень приміщень з зазначенням власної звукоізоляції (табл. Л5.1). За результатами табл.Л5.1



складається таблиця із зазначенням інтенсивності звуку, що надходить із суміжних приміщень, а також сумарна інтенсивність зовнішніх звуків і розраховується рівень шуму для приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери.

Як тестові шумові сигнали у розрахунках застосовуються натуральні звуки вулиці, суміжних приміщень, а також сигнал білого шуму з рівнем 94 дБ, що використовувався у попередній лабораторній роботі при вимірюванні звукоізоляції огорожень.

Результатом роботи є розраховане значення рівня сторонніх шумів для приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери.

Лабораторний стенд складається з приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери, для яких визначаються рівень звукових сигналів, що надходять із суміжних приміщень.

План навчальної лабораторії №215-Б та акустичної камери, що встановлена в лабораторії №215-Б з геометричними розмірами огорожень наведені на рис. Л5.1, а окремі геометричні розміри приміщень наведені у розд.2.

### **Послідовність виконання роботи**

1. Ознайомитись із планом навчальної лабораторії та акустичної камери й уточнити розміри огорожень приміщень, зокрема, товщину та конструктивні особливості стін, стелі тощо за допомогою рулетки. Описати елементи облаштування приміщення й визначити конструктивні особливості огорожень приміщення з точки зору звукоізоляційних властивостей (облицьовувальні матеріали, внутрішнє заповнення, площі елементів перегородок, як то – двері, вікна тощо). Результати занести у табл. Л5.1-1 – для навчальної лабораторії та Л5.1-2 – для акустичної камери.
2. За результатами п.1 з довідникових даних (додаток Д) визначити коефіцієнти власної звукоізоляції для відповідних перегородок. Результати занести у табл. Л5.1-1 для навчальної лабораторії та табл. Л5.1-2 для акустичної камери.
3. Виміряти орієнтовно розміри (площі) звукоізоляційних поверхонь. Враховуючи результати п.2, скласти табл. Л5.2-1 та Л5.2-2, в які занести площі відповідних огорожень, власну звукоізоляцію огорожень та орієнтовний рівень сторонніх шумів для відповідних суміжних просторів. Значення рівнів сигналів відповідних територій, просторів, приміщень наведені у додатку Г та [4]. Для визначення звукоізоляції перегородок акустичної камери як тестовий сигнал застосовувати у розрахунках білий шум з рівнем 94 дБ.
4. Розрахувати значення звукової енергії (інтенсивності звуку), що надходить у визначені приміщення навчальної лабораторії та акустичної камери з кожного суміжного простору (приміщення), а також сумарну звукову енергію, що проникає у приміщення з усіх сторін. Результати занести у табл. Л5.2-1, Л5.2-2

відповідно для навчальної лабораторії та акустичної камери.

5. Розрахувати рівень сторонніх шумів, що надходять через огороження у приміщенні навчальної лабораторії та акустичної камери з урахуванням та без звукопоглинання у приміщенні. Очікуваний рівень акустичних сигналів суміжних приміщень (білого шуму для огорожень акустичної камери), що проходить через відповідну перегородку без урахування звукопоглинання розраховується за формулою  $L_{\text{ш}i} = 10 \lg(S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)})$  і заноситься у останній стовпчик табл. Л5.2. Для розрахунку сумарного рівня шуму, що проникає у лабораторію через усі перегородки одночасно без урахування звукопоглинання в лабораторії, підсумовуються всі значення передостаннього стовпчика табл. Л5.2, значення вписується знизу передостаннього стовпчика, а потім за формулою  $L_{\text{ш}\Sigma} = 10 \lg \sum_i S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$  розраховується сумарний рівень шуму.
6. У висновках навести та пояснити відмінності отриманих розрахованих значень рівня шумів від виміряних у ЛР №4.

У звіті про лабораторну роботу привести:

- план акустичної камери і самої лабораторії;
- узагальнений порядок виконання роботи та розрахунків з відображенням формул;
- таблиці розрахованих значень звукоізоляції.

У звіті обов'язково зробити **висновок** про відповідність розрахованих значень виміряним результатам звукоізоляції, що отримані в лабораторній роботі №4.

Таблиця Л5.1-1 – Акустичні та архітектурні характеристики огорожень навчальної лабораторії

Найменування огорожень	Джерело шуму	Рівень шуму джерела (в суміжних приміщеннях), дБ	Конструкція огороження	Власна звукоізоляція, $\sigma_i$ дБ
Стіна між лабораторією та вулицею	Вулиця з середньою інтенсивністю руху			
Вікно між лабораторією та вулицею	Вулиця з середньою інтенсивністю руху		Склопакет з двома склами і повітряним проміжком - 5×16×5	25
Стіна між лабораторією та аудиторією 215-А	Навчальна лекційна аудиторія 215-А			
Стіна між лабораторією та коридором	Коридор середньої інтенсивності			

Двері між лабораторією та коридором	Коридор середньої інтенсивності			14
Перегородка між лабораторією та технічним приміщенням	Друга (технічна) частина лабораторії			
Повітряний простір між лабораторією та технічним приміщенням	Друга (технічна) частина лабораторії			
Перекриття над лабораторією	Навчальна лекційна аудиторія 321			
Перекриття під лабораторією	Навчальна лекційна аудиторія 125			

Таблиця Л5.1-2 – Акустичні та архітектурні характеристики огорожень акустичної камери

Найменування огорожень	Джерело шуму	Рівень шуму джерела, дБ (білий шум)	Конструкція огороження	Власна звукоізоляція, $\sigma_i$ дБ
Стіна між точками 1 та 2	ГМ у акустичній камері		Подвійна дерев'яна стіна з вагонки з заповненням скловатою 50 мм, загальна товщина 75 мм	30
Двері між точками 1 та 2	ГМ у акустичній камері		Фільончасті двері з однієї сторони оббиті дерматином із заповненням поролоном 20 мм	14
Стіна між точками 1 та 3	ГМ у акустичній камері		Стіна ДВП-скловата-пластикова вагонка, загальна товщина 65 мм	24
Стіна між точками 1 та 4	ГМ у акустичній камері		Стіна ДСП-скловата-дерев'яна вагонка, загальна товщина 85 мм	32
Стіна між точками 1 та 5	ГМ у акустичній камері		Стіна ДВП-скловата-дерев'яна вагонка, загальна товщина 70 мм	26
Вікно в апаратну між точками 1 та 5	ГМ у акустичній камері		Склопакет з двома склами і повітряним проміжком - 5×16×5	25

Таблиця 5.2-1 – Визначення звукової енергії, що проникає із суміжних приміщень (просторів) у навчальну лабораторію через огороження ( $L_{\text{ш}i} = 10 \lg(S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)})$ )

Найменування поверхонь, що огорожують зал	$S_i, \text{м}^2$	Рівень шуму в суміжних приміщеннях $L, \text{дБ}$	$\sigma_i, \text{дБ}$	$\frac{L_i - \sigma_i}{10}$	$10^{\frac{L_i - \sigma_i}{10}}$	$S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$	Рівень $L_{\text{ш}i}, \text{дБ}$
Стіна між лабораторією та вулицею							
Вікно між лабораторією та вулицею							
Стіна між лабораторією та аудиторією 215-А							
Стіна між лабораторією та коридором							
Двері між лабораторією та коридором							
Перегородка між лабораторією та технічним приміщенням							
Повітряний простір між лабораторією та технічним приміщенням							
Перекрыття над лабораторією							
Перекрыття під лабораторією							
Всього: $\sum_i S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$							
Сумарний рівень шуму без урахування звукопоглинання $L_{\text{ш}\Sigma} = 10 \lg \sum_i S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$							

Таблиця 5.2-2 – Визначення звукової енергії, що проникає із акустичної камери у лабораторію через огороження ( $L_{\text{ш}i} = 10 \lg(S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)})$ )

Найменування поверхонь, що огорожують зал	$S_i, \text{м}^2$	Рівень білого шуму в АК $L, \text{дБ}$	$\sigma_i, \text{дБ}$	$\frac{L_i - \sigma_i}{10}$	$10^{\frac{L_i - \sigma_i}{10}}$	$S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$	Рівень $L_{\text{ш}i}, \text{дБ}$
Стіна між точками 1 та 2							
Двері між точками 1 та 2							
Стіна між точками 1 та 3							
Стіна між точками 1 та 4							

Стіна між точками 1 та 5							
Вікно в апаратну між точками 1 та 5							
Всього: $\sum_i S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$							
Сумарний рівень шуму без урахування звукопоглинання						$L_{ш\Sigma} = 10 \lg \sum_i S_i \cdot 10^{0,1(L_i - \sigma_i)}$	

### Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику визначення звукоізоляційних властивостей огорожень приміщення
2. Пояснити методику виконання розрахунків в контексті лабораторної роботи.
3. Пояснити значення розрахованих результатів і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
4. Пояснити відмінність отриманих результатів з практичними дослідженнями звукоізоляції огорожень приміщень.
5. Зазначити які результати теоретично можливі для даних приміщень і чим вони визначаються.
6. Пояснити які умови з точки зору звукоізоляції у досліджуваних приміщеннях не відповідають необхідним для даного типу приміщень.
7. Зазначити та пояснити основні акустичні параметри з точки зору рівня сторонніх шумів приміщень різного призначення.
8. Зазначити та порівняти основні конструктивні особливості перегородок приміщень з точки зору звукоізоляції перегородок приміщення.
9. Зазначити придатність навчальної лабораторії з точки зору звукоізоляції до проведення лекційних занять.
10. Назвати будівельні, побутові, природні тощо матеріали, які володіють звукоізоляційними властивостями.
11. Пояснити вимоги до звукоізоляції окремих приміщень.

Література [1,2,3,4,5,8].

## Лабораторна робота №6

### *Дослідження коефіцієнта звукопоглинання звукопоглинальних матеріалів*

**Мета роботи:** експериментально дослідити звукопоглинальні властивості звукопоглинальних матеріалів різного призначення та визначення коефіцієнта звукопоглинання окремих матеріалів

### Опис роботи

В процесі виконання роботи досліджуються конструктивні особливості різних матеріалів, предметів тощо, визначається спроможність цих матеріалів поглинати звукові хвилі, вимірюється час реверберації у приміщенні без та із звукопоглинальним матеріалом й розраховується дифузний коефіцієнт звукопоглинання матеріалів.

Як приміщення для визначення звукопоглинальних властивостей матеріалів застосовується акустична камера, що встановлена в лабораторії №215-Б.

Як тестові сигнали застосовуються шумові та тональні сигнали, що формуються генератором тестових сигналів, а також джерелами натурального звучання. Як джерела тестових сигналів застосовуються натуральний звук одиночного плескання у долоні, тональні сигнали та шумовий сигнал, що змодельовані у програмному забезпеченні NUENDO.

Результатом роботи є значення коефіцієнтів звукопоглинання таких матеріалів як: пінопласт, поролон, а також людей.

Лабораторний стенд складається з:

- приміщень навчальної лабораторії та акустичної камери, в яких вимірюються коефіцієнти звукопоглинання матеріалів;
- генератора тестових сигналів (ГТС) або персонального комп'ютера (ПК) з програмним забезпеченням (ПЗ) NUENDO, в якому змодельовані тестові сигнали;
- гучномовця (ГМ) - активної звукової колонки (ЗК) "Samson Expedition Pro";
- професійного аудіоаналізатора "РААЗ", включеного у режим вимірювання часу реверберації;
- звукопоглинальні матеріали: поролон, пінопласт та інші.

Схему дослідження зображено на рис. Лб.1.

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись зі схемою лабораторного стенду та умовами вимірювання коефіцієнта звукопоглинання матеріалів.
2. Перед включенням приладів встановити регулятори рівня сигналу на ГТС (або на ПК у ПЗ NUENDO 1 каналу) і на гучномовці (ЗК) у крайнє ліве положення.

3. Налаштувати вимірювач РААЗ на режим вимірювання рівня та спектру сигналу, а обладнання для відтворення звукових тестових сигналів у акустичній камері. Звернути увагу на смугу частот, в якій вимірюється рівень звукового сигналу, що визначається типом фільтру А, або С, або з наскрізною широкою смугою (Flat). (Для вимірювань застосовувати фільтр або С або Flat). Гучномовець для відтворення тестових сигналів встановити у акустичну камеру (рис. Л6.1).

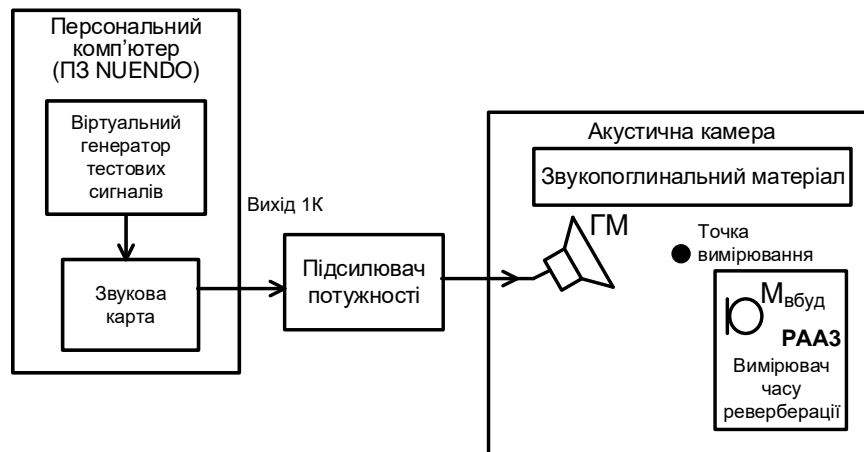


Рисунок Л6.1 - Схема лабораторного стенду

4. Включити живлення приладів і пристроїв стенду. Встановити на ГТС або ПК (ПЗ NUENDO) частоту сигналу 1 кГц і за допомогою регуляторів рівня на ГТС (або ПК) і гучності на гучномовці налаштувати таку гучність гучномовця, що відповідає рівню 94 дБ (звуковий тиск 1 Па). Вимірювання початкового рівня звукового тиску проводити вимірювачем РААЗ з фільтром С на відстані 1 м від гучномовця (точка вимірювання на рис. 6.1).
5. Налаштувати вимірювач РААЗ у режим вимірювання часу реверберації та перевірити працездатність. Методика вимірювання часу реверберації наведена у лабораторній роботі №1. Як джерело акустичного сигналу застосувати одиночний оплеск у долоні. Налаштування здійснювати у лабораторії 215-Б при умові присутності всіх студентів та за умови їх відсутності. Значення часу реверберації і розрахований коефіцієнт звукопоглинання людей обов'язково враховувати у звіті лабораторної роботи.
6. Виміряти час реверберації у приміщенні акустичної камери без внесених звукопоглинальних матеріалів, застосовуючи тестові сигнали різних частот і шумові сигнали. (методику виконання вимірювання часу реверберації за допомогою РААЗ див. у ЛР №1, 2). Результати вимірювань занести у табл. Л6.1.
7. Виміряти час реверберації у приміщенні акустичної камери з внесеним звукопоглинальним матеріалом (пінопласт, поролон, люди), застосовуючи тестові сигнали різних частот і шумові сигнали. Результати вимірювань занести

у табл. Лб.1.

8. Розрахувати коефіцієнт звукопоглинання матеріалів за формулою:

$$\alpha_x = 0,161 \frac{V}{S_x} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$$

де  $V=2,28 \times 1,78 \times 2,8=11,4 \text{ м}^3$  – об'єм приміщення акустичної камери,

$V=14,5 \times 7,4 \times 3,5=375,55 \text{ м}^3$  – об'єм приміщення навчальної лабораторії;

$S_x$  – площа звукопоглинального матеріалу;

$T_1$  – час реверберації до внесення звукопоглинального матеріалу;

$T_2$  – час реверберації після внесення звукопоглинального матеріалу.

Результати розрахунку занести у табл. Лб.2.

9. За результатами розрахунків коефіцієнта звукопоглинання побудувати графіки залежності коефіцієнта звукопоглинання від частоти сигналу. На графіках також зобразити довідникові дані стосовно звукопоглинання досліджуваних матеріалів.

Порівняти середній коефіцієнт звукопоглинання у акустичній камері з розрахованим звукопоглинанням, враховуючи розрахунки, що проводились у лабораторній роботі №1.

10. У висновках навести та пояснити відмінності отриманих результатів вимірювань від довідникових значень та розрахованих у ЛР №1.

Перед відключенням обладнання необхідно вивести у крайнє ліве положення регулятори рівня та гучності на ГТС і ГМ.

У звіті про лабораторну роботу привести:

- схему лабораторного стенду;

- узагальнений порядок виконання роботи;

- таблиці вимірних значень та графіки залежності значення коефіцієнтів звукопоглинання від частоти сигналу;

У звіті обов'язково зробити **висновок** про відповідність практичних результатів теоретичним положенням і суб'єктивну оцінку якості звукоізоляції у приміщеннях навчальної лабораторії та акустичній камері.

Таблиця Лб.1 – Результати вимірювання часу реверберації приміщення з урахуванням наявності в ньому звукопоглинальних матеріалів

Час реверберації	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц	«Білий» шум	Плескання у долоні
$T_1$								
$T_2$ (люди)								
$T_2$ (пінопласт)								
$T_2$ (поролон)								



Таблиця Л4.2 – Результати визначення значення коефіцієнта звукопоглинання

Час реверберації	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц	«Білий» шум	Плескання у долоні
$\alpha_{\text{поч}}$								
$\alpha_{\text{люди}}$								
$\alpha_{\text{пінопласт}}$								
$\alpha_{\text{поролон}}$								

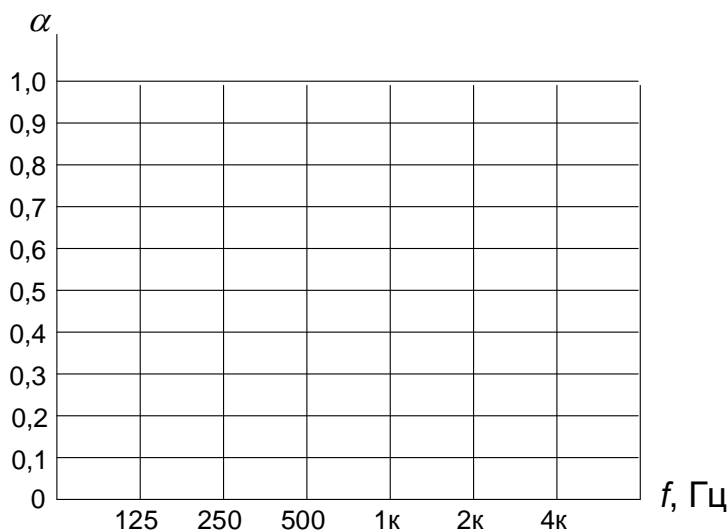


Рисунок Л4.2 - Графік для побудови залежності коефіцієнта звукопоглинання від частоти

### Питання для самоперевірки та на захист роботи

1. Пояснити методику виконання вимірювань в контексті лабораторної роботи.
2. Пояснити значення отриманих результатів, що визначають отримані значення і як можна характеризувати акустичні умови приміщень з такими результатами.
3. Пояснити відмінність отриманих результатів з можливими теоретичними даними.
4. Зазначити які результати звукопоглинання теоретично можливі для даних приміщень і чим вони визначаються.
5. Пояснити які акустичні умови необхідні для проведення вимірювання звукопоглинальних властивостей матеріалів й конструкцій.
6. Зазначити та пояснити звукопоглинальні властивості матеріалів та конструкцій різного призначення.
7. Пояснити які і чому саме такі тестові сигнали і у такому частотному діапазоні застосовуються для вимірювання коефіцієнта звукопоглинання матеріалів та конструкцій.
8. Зазначити придатність навчальної лабораторії та акустичної камери з точки зору акустичних умов для проведення вимірювання коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів.

9. Класифікувати звукопоглинальні матеріали, що знаходяться у лабораторії та акустичній камері.

Література [1,2,3,4,5,6].

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.А. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; Под ред. Ю.А. Ковалгина. - М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007. - 872 с.: ил.
2. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; Под ред. профессора Ю.А. Ковалгина. - М.: Горячая линия – Телеком; 2009. - 660 с.: ил.
3. Акустика: Справочник / А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А.Сапожков, В.И.Шоров; Под ред. М.А.Сапожкова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 336 с.
4. О.П. Гребінь. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Архітектурна акустика» на тему «Проектування акустичних умов кінотеатральних зал», для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050803 Акустотехніка спеціальності „Аудіо-, відео- та кінотехніка” усіх форм навчання / Укл. О.П. Гребінь, О.М. Прядко, Н.Ф. Левенець. - К.: КПІ, 2016. - 192 с.
5. Кнудсен Верн Оливер. Архитектурная акустика: Пер. с англ. / Под ред. Е.А. Копиловича, Л.Д. Брызжева. Изд. 4-е. - М.: Издательство ЛКИ, 2007. - 520 с.
6. Сапожков М. А. Электроакустика. - М.: «Связь», 1978. - 272с., ил.
7. И. Алдошина. Музыкальная акустика. / И. Алдошина, Р. Приттс. Учебник. - СПб.: Композитор Санкт-Петербург; 2006. - 720 с: ил.
8. А.Е. Колесников. Акустические измерения. - Л.: Судостроение, 1983. 256 с., ил.
9. ГОСТ 24146-89 ЗРИТЕЛЬНЫЕ ЗАЛЫ. Метод измерения времени реверберации. Дата введения 1990-01-01.
10. Петелин Р.Ю., Петелин Ю.В. Музыкальный компьютер. Секреты мастерства. 2-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БВХ-Петербург; Арлит, 2004. - 688 с.: ил.
11. SCHROEDER, M.R., New Method of Measuring Reverberation Time. J. Acoust. Soc. Am., 37 (1965) pp. 409—412.
12. Лубянова К.В. Сравнительный анализ методов измерения времени реверберации в закрытых помещениях. Национальный технический университет Украины ‘КПИ’. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/konfer30/668.pdf>

13. ГОСТ Р 54579-2011 Акустика. Применение новых методов измерений в акустике зданий и помещений. ISO 18233:2006 Acoustics — Application of new measurement methods in building and room acoustics (MOD). Москва. Стандартиформ, 2012.
14. Иллюстрированный самоучитель по SoundForge 5. [Электронный ресурс] - Режим доступа до стат. <http://samoucka.ru/document13001.html>
15. Nuendo – виртуальная лаборатория звука. Иллюстрированный самоучитель по виртуальному звуку. [Электронный ресурс] - Режим доступа до стат. <http://samoucka.ru/document12679.html>
16. Степаненко В.І. Методичні рекомендації до роботи з персональним аудіо аналізатором РААЗ. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 13 с.

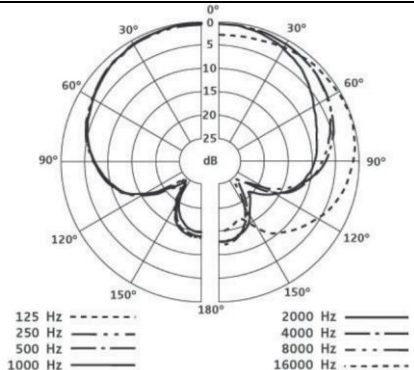
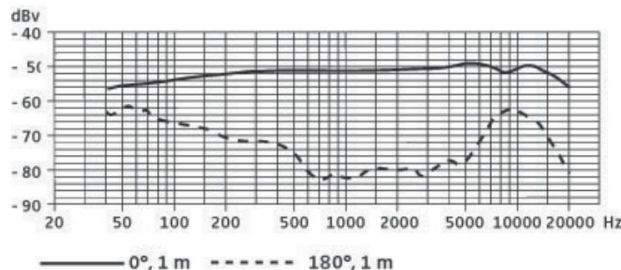
## ДОДАТОК А ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ МІКРОФОНІВ

### AKG D880

Загальний вигляд	
Тип перетворювача	Динамічний приймач градієнта тиску
Чутливість	2,5 мВ/Па (-52 дБ)
Полярна діаграма спрямованості	Суперкардіоїда: 
Частотна характеристика	60-20000 Гц на 1м (20-20000 Гц на 1см): 
Імпеданс	<600 Ом
Рекомендоване навантаження	>2000 Ом
Еквівалентний рівень шуму	22 дБ(А) (DIN 45412)
Максимальний рівень звукового тиску для 1% (3%) КНС	142 дБ (156 дБ)
Температура навколишнього середовища	від -10°C до +60°C
Вологість (+20°C)	95%
Зовнішній рознімач	3-pin XLR
Розміри	50 мм (макс. діаметр); 180 мм (довжина)
Вага	295 г

### Sennheiser e614

Загальний вигляд	
Тип перетворювача	Конденсаторний пре-поляризований
Чутливість	3 мВ/Па
Полярна діаграма	Суперкардіоїда:

	 <p>Legend for Polar Plot:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>125 Hz: dashed line</li> <li>250 Hz: dash-dot line</li> <li>500 Hz: solid line</li> <li>1000 Hz: solid line</li> <li>2000 Hz: solid line</li> <li>4000 Hz: solid line</li> <li>8000 Hz: solid line</li> <li>16000 Hz: solid line</li> </ul>
Частотна характеристика	<p>40-20000 Гц на 1 м:</p>  <p>Legend for Frequency Response Graph:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0°, 1 m: solid line</li> <li>180°, 1 m: dashed line</li> </ul>
Імпеданс	50 Ом
Рекомендоване навантаження	>1000 Ом
Фантомне живлення	12-52 В / 3 мА
Максимальний рівень звукового тиску КНС	139 дБ
Зовнішній рознімач	3-pin XLR
Розміри	20 мм (макс. діаметр); 100 мм (довжина)
Вага	93 г

## ДОДАТОК Б

### ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ГУЧНОМОВЦІВ

#### Samson Resolv 65a

Загальний вигляд	
Функціональне призначення	Звуковий монітор
Частотна характеристика	62-25000 Гц ( $\pm 3$ дБ):  FREQUENCY RESPONSE
Чутливість	97 дБ (1 Вт / 1м)
Частота розділення	2300 Гц
Входи	незбалансований RCA (-10 дБВ) збалансований комбінований XLR/TRS-6.3 (+4 дБВ)
Розміри	235x346x273 мм
Вага	8200 г
Номінальна потужність	100 Вт
НЧ головка	
Тип головки	Динамічна
Діаметр	650 мм
Споживана потужність	75 Вт
ВЧ головка	
Тип головки	Динамічна
Діаметр	254 мм
Споживана потужність	25 Вт

## Samson Expedition Pro XP300

Загальний вигляд	
Функціональне призначення	Звукова колонка
Частотна характеристика	60-15000 Гц ( $\pm 3$ дБ)
Частота розділення	2300 Гц (24 дБ на октаву)
Входи	2xTS (Mono Jack 1/4") 1xTS (Mono Jack 1/4") (для підсилених сигналів) 1xTRS (Stereo Jack 1/4") 3xXLR (Mono) 2xRCA (L(Mono)+R)
Виходи	2xXLR (2xMono або L+R в залежності від режиму)
Розміри	371x441x539 мм
Вага	20400 г
Номінальна потужність	200 Вт
НЧ головка	
Тип головки	Динамічна
Діаметр	3048 мм
Споживана потужність	160 Вт
ВЧ головка	
Тип головки	Динамічна
Діаметр	254 мм
Споживана потужність	40 Вт

## ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Коефіцієнти звукопоглинання матеріалів і об'єктів

№№ пп.	Найменування матеріалів і конструкцій	Частота, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Бетонна нефарбована поверхня	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
2	Бетонна пофарбована поверхня	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02
3	Вікно із скла	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
4	Гіпсокартонні листи без віднесення	0,02	0,05	0,06	0,08	0,05	0,05
5	Гіпсокартонні листи з віднесенням 50 мм	0,3	0,25	0,15	0,08	0,05	0,05
6	Двері лаковані	0,03	0,02	0,05	0,04	0,04	0,04
7	Двері соснові	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
8	Дерев'яна панель лакована впритул до стіни	0,01	0,02	0,05	0,04	0,04	0,04
9	Дерев'яна панель (вагонка) товщиною 5...10 мм з повітряним проміжком 50 мм	0,25	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
10	Дерев'яне обшиття із сосни, товщиною 20 мм на твердій основі	0,1	0,1	0,09	0,08	0,08	0,11
11	Драпірування плюшеве у вигляді порт'єр, що вільно звисає із складками (щільність 0,65 кг/м <sup>2</sup> )	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65
12	Драпірування з бархату, що вільно звисає (щільність 0,6 кг/м <sup>2</sup> )	0,1	0,3	0,5	0,65	0,72	0,65
13	Драпірування, що вільно звисає (щільність 0,35 кг/м <sup>2</sup> )	0,04	0,04	0,11	0,17	0,3	0,35
14	Засклення (віконне скло у рамі)	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
15	Килим або килимова доріжка	0,12	0,14	0,23	0,32	0,38	0,42
16	Килим безворсовий	0,02	0,05	0,07	0,11	0,29	0,48
17	Килим з високим ворсом	0,02	0,05	0,26	0,47	0,54	0,70
18	Килим з середнім ворсом	0,02	0,1	0,28	0,4	0,52	0,6
19	Крісла, що оббите шкірою	0,10	0,12	0,17	0,17	0,12	0,10
20	Крісла, що оббите шкірою з поролоном	0,05	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16
21	Крісло напівм'яке	0,09	0,12	0,14	0,16	0,15	0,16
22	Диван, оббитий шкірою з	0,2	0,4	0,5	0,56	0,6	0,62



	поролоном, загальною площею 4м <sup>2</sup>						
23	Лінолеум (полівінілацетат) на твердій основі	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
24	Люди (на одну людину)	0,28	0,40	0,45	0,49	0,47	0,45
25	Панель із фанери, товщиною 3 мм на каркасі з брусків 8x10 см, комірками з кроком 0,5x0,7 м і повітряним проміжком 10 см	0,32	0,35	0,19	0,13	0,11	0,1
26	Перфоровані конструкції ( отвори діаметром 6 мм з кроком 25 мм) з фанери, товщиною 3 мм на каркасі з брусків 50x50 мм, комірками 600x600 мм із заповненням азбестовою ватою у мішковині	0,2	0,46	0,58	0,52	0,42	0,31
27	Підлога паркетна	0,06	0,07	0,06	0,05	0,05	0,07
28	Стільці дерев'яні	0,02	0,02	0,03	0,035	0,038	0,038
29	Стіна підштукатурена й пофарбована клейовою фарбою	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
30	Стіна підштукатурена й пофарбована масляною фарбою	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
31	Стіна цегляна не штукатурена	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
32	Студійний інвентар, технічні пристрої, обладнання стійкою (на 1 предмет)	0,23	0,28	0,26	0,29	0,32	0,36
33	Штукатурка гіпсова	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
34	Штукатурка звичайна	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
35	Мати з мінеральної вати	0,17	0,59	0,99	0,98	0,96	0,87
36	Стіл з ДСП	0,03	0,03	0,04	0,045	0,048	0,048
37	Меблі із ДСП, що вільно розташовані	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
38	Екран перфорований	0,08	0,09	0,11	0,14	0,16	0,16
39	Акустичний поролон	0,1	0,19	0,39	0,66	0,65	0,64
40	Пінопласт товщиною 50 мм без віднесення	0,02	0,09	0,19	0,16	0,14	0,12
41	Диван шкіряний (1 м <sup>2</sup> )	0,05	0,1	0,12	0,14	0,15	0,15
42	Жалюзі пластикові, товщиною 0,5 мм	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
43	Екран перфорований	0,08	0,09	0,11	0,14	0,16	0,16

44	Мармур, граніт	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
45	Метлахська плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
46	Підлога на дерев'яних балках	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
47	Скло дзеркальне	0,035	0,025	0,019	0,012	0,07	0,04
48	Скло жорстке	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02

Таблиця В.2 – Коефіцієнти звукопоглинання спеціалізованих звукопоглинальних матеріалів і конструкцій

№№ пп.	Найменування матеріалів і конструкцій	Частота, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Панель з фанери товщиною 8 мм:						
1	з віднесенням 50 мм	0,13	0,23	0,17	0,1	0,04	0,09
2	з віднесенням 100 мм	0,35	0,15	0,09	0,1	0,04	0,1
3	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80, товщиною 50 мм	0,44	0,45	0,22	0,12	0,04	0,1
4	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 100 мм	0,53	0,35	0,21	0,12	0,06	0,13
	Панель з фанери товщиною 4–5 мм:						
5	з віднесенням 50 мм	0,17	0,4	0,14	0,1	0,08	0,08
6	з віднесенням 100 мм	0,42	0,28	0,18	0,09	0,12	0,25
7							
	Деревно-стружкові плити 3500x1750x20 мм (620 – 630 кг/м³)						
8	впритул (без віднесення) до стіни, нефарбовані	0,01	0,09	0,09	0,08	0,09	0,14
9	з віднесенням 50 мм	0,32	0,13	0,05	0,05	0,06	0,13
10	з віднесенням 100 мм	0,27	0,08	0,04	0,02	0,08	0,1
11	з віднесенням 50 мм та заповненням ПП-80	0,32	0,14	0,07	0,04	0,08	0,13
12	з віднесенням 100 мм та заповненням ПП-80	0,3	0,24	0,08	0,07	0,1	0,13
	Акустичний фіброліт товщиною 35 мм (300 кг/м³), нефарбований (плити з деревної шерсті з цементом):						
13	без віднесення	0,06	0,16	0,25	0,38	0,59	0,63
14	з віднесенням 100 мм	0,08	0,27	0,46	0,35	0,54	0,60
15	з віднесенням 150 мм	0,13	0,42	0,53	0,35	0,53	0,63
	Деревно-волокнисті плити						
16	ДВП 1000x400x12 мм впритул до стіни	0,22	0,30	0,34	0,32	0,41	0,42
17	завтовшки 25 мм впритул до стіни	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
18	в два шари, товщина кожного шару 25 мм в притул до стіни	0,33	0,42	0,47	0,41	0,42	0,36
19	типу “Орголіт” завтовшки 12 мм впритул до стіни	0,06	0,15	0,28	0,30	0,33	0,31
20	типу “Орголіт” завтовшки 12 мм з	0,14	0,25	0,29	0,31	0,41	0,42





74	без віднесення	0,11	0,3	0,85	0,90	0,78	0,72
75	з віднесенням 50 мм без заповнювача	0,2	0,71	0,88	0,81	0,71	0,79
	Надтонке скловолокно (у вигляді матів або на рейках/плитах) з облицюванням із склотканини						
76	мати товщиною 50 мм	0,4	0,85	0,98	0,99	0,93	0,97
77	товщиною 100 мм на дерев'яній решітці з рейок шириною 20..25 мм, товщиною 10..12 мм, розмірами комірок 15...20 мм	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
78	товщиною 50 мм на просіяно-втяжних листах, товщиною 2 мм, перфорація 74%	0,25	0,7	0,95	0,99	0,99	0,99
79	товщиною 50 мм на просіяно-втяжних листах, товщиною 2 мм, перфорація 74% з повітряним проміжком 200 мм	0,63	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	Конструкції з перфорованої фанери товщиною 4 мм, $d = 5$ мм, $D = 35$ мм:						
80	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,19	0,90	0,76	0,28	0,15	0,1
81	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,25	0,96	0,66	0,26	0,16	0,1
82	з віднесенням 160 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,39	0,87	0,58	0,33	0,15	0,1
83	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,65	0,9	0,64	0,28	0,15	0,12
84	з віднесенням 200 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,78	0,98	0,68	0,27	0,16	0,12
85	з віднесенням 50 мм, шар мінеральної вати товщиною 50 мм	0,23	0,9	0,72	0,25	0,18	0,15
86	з віднесенням 100 мм, вата 50 мм	0,36	0,97	0,72	0,31	0,22	0,15
	Конструкції з перфорованої фанери товщиною 4 мм, $d = 5$ мм, $D = 65$ мм:						
87	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,26	0,88	0,38	0,25	0,12	0,1
88	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,43	0,69	0,33	0,17	0,1	0,1
89	з віднесенням 150 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,51	0,6	0,33	0,15	0,1	0,1
90	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,61	0,68	0,37	0,20	0,17	0,1
	Конструкції з перфорованої фанери товщиною 4 мм, $d=5$ мм, $D=100$ мм:						
91	з віднесенням 50 мм	0,06	0,42	0,2	0,07	0,07	0,06
92	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,37	0,68	0,31	0,15	0,1	0,09
93	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,4	0,7	0,3	0,12	0,1	0,05
94	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,77	0,64	0,3	0,15	0,15	0,1

Конструкції з перфорованої фанери товщиною 4 мм, $d=4$ мм, $D=40$ мм:							
95	з віднесенням 50 мм	0,06	0,22	0,31	3,12	0,1	0,08
96	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,31	0,99	0,51	0,14	0,14	0,1
97	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,4	0,84	0,4	0,16	0,14	0,12
98	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,68	0,88	0,41	0,17	0,14	0,1
Конструкції з перфорованої фанери товщиною 4 мм, $d = 20$ мм, $D = 60$ мм:							
99	з віднесенням 50 мм,	0,06	0,08	0,17	0,16	0,1	0,08
100	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,23	0,85	0,99	0,54	0,31	0,28
101	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,27	0,84	0,96	0,36	0,32	0,26
102	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,50	0,89	0,97	0,6	0,32	0,26
Конструкції з перфорованого пластика $d = 5$ мм, $D = 35$ мм, з підклеєнням склотканини:							
103	з віднесенням 100 мм	0,05	0,34	0,35	0,14	0,05	—
104	з віднесенням 150 мм	0,15	0,42	0,32	0,11	0,06	—
105	з віднесенням 50 мм, заповнювач ПП-80 товщиною 50 мм	0,14	0,77	0,9	0,4	0,19	0,14
106	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,28	0,95	0,95	0,38	0,14	0,14
107	з віднесенням 150 мм, заповнювач ПП-80 50 мм	0,42	0,96	0,77	0,43	0,16	0,16
108	з віднесенням 100 мм, заповнювач ПП-80 100 мм	0,66	0,96	0,88	0,47	0,2	0,16
Конструкції з перфорованого пластика $d = 5$ мм, $D = 65$ мм, заповнювач ПП-80:							
109	з віднесенням 50 мм	0,18	0,78	0,44	0,2	0,05	—
110	з віднесенням 100 мм	0,58	0,74	0,45	0,28	0,02	—
111	з віднесенням 100 мм, повітряний проміжок 50 мм	0,23	0,71	0,39	0,22	0,05	
112	з віднесенням 150 мм, повітряний проміжок 100 мм	0,53	0,64	0,4	0,18	0,05	—
Конструкції з перфорованого пластика $d = 5$ мм, $D = 35$ мм.							
а) з підклеєнням двох шарів марлі							
113	з віднесенням 50 мм	—	0,09	0,36	0,22	0,04	0,02
114	з віднесенням 150 мм	0,06	0,47	0,3	0,11	0,04	—
115	з віднесенням 200 мм	0,14	0,47	0,24	0,16	0,03	—
б) з підклеєнням бязі в один шар (бязь артикул 69, $r = 59$ г/сек)							
116	з віднесенням 50 мм	0,05	0,16	0,55	0,31	0,03	0,02
117	з віднесенням 100 мм	0,07	0,37	0,45	0,26	0,12	0,08

	Конструкції з перфорованого пластика $d=5$ мм, $D = 65$ мм:						
	а) з підклеєнням двох шарів марлі						
118	з віднесенням 50 мм	0,06	0,32	0,35	0,12	0,07	—
119	з віднесенням 150 мм	0,22	0,41	0,24	0,13	0,07	—
120	з віднесенням 200 мм	0,25	0,40	0,19	0,12	0,07	—
	б) з підклеєнням одного шару бязі						
121	з віднесенням 50 мм	0,04	0,33	0,4	0,16	0,05	0,03
122	з віднесенням 100 мм	0,07	0,47	0,31	0,12	0,06	0,04
	Поліциліндричні конструкції:						
	а) хорда 1000 мм, стріла виносу – 300 мм						
123	з віднесенням 50 мм	0,41	0,3	0,35	0,16	0,1	0,14
124	з віднесенням 50 мм, заповнювач товщиною 50 мм	0,49	0,44	0,39	0,19	0,13	0,22
125	на деревно-стружковій плиті з віднесенням 100 мм	0,45	0,32	0,29	0,16	0,16	0,18
	б) хорда 700 мм, стріла виносу – 200 мм						
126	з віднесенням 50 мм	0,51	0,21	0,32	0,18	0,08	0,13
127	з віднесенням 50 мм, заповнювач товщиною 50 мм	0,5	0,40	0,44	0,33	0,13	0,16
	в) змішаний варіант (поліциліндри обох типів)						
128	з віднесенням 50 мм	0,42	0,31	0,32	0,16	0,08	0,12
129	з віднесенням 50 мм, заповнювач товщиною 50 мм	0,49	0,49	0,43	0,28	0,13	0,19
	Гофровані конструкції:						
130	з віднесенням 25 мм	0,2	0,25	0,11	0,05	0,11	0,1
131	з віднесенням 50 мм	0,2	0,28	0,15	0,12	0,13	0,16
132	на деревно-стружкових плитах товщиною 20 мм	0,29	0,28	0,17	0,13	0,15	0,17
	Мати та панелі						
133	Мати з мінеральної вати	0,17	0,59	0,99	0,98	0,96	0,87
134	Мати із склополотна АТМ1-50П	0,36	0,76	0,98	0,89	0,88	0,58
135	Мати із склополотна «Атимс» з віднесенням 50 мм	0,08	0,26	0,64	0,89	0,75	0,78
136	Панель з «волоknіту» з віднесенням 50 мм	-	0,10	0,22	0,21	0,08	-
137	Панель з «волоknіту» з віднесенням 50 мм і заповненням	0,16	0,72	0,93	0,20	0,14	0,02

## ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Максимальні рівні корисного сигналу і припустимі рівні шумів в різних приміщеннях

Джерело шуму	Максимальний рівень звучання корисного сигналу або створюваного шуму, дБ	Припустимий рівень проникаючого шуму, дБ
Телевізійні студії	100	30
Концертна радіомовна студія	105	25
Камерна радіомовна студія	85	25
Мовна радіомовна і дикторська телевізійні студії	85	25
Апаратні з проведенням слухового контролю	85	40
Павільйон для синхронних кінозйомок	85	25-30
Ательє для запису музики	95	20-25
Кінопроекційна апаратна	95	45
Кінотеатральна зала	100	40
Театральні зали	90	30
Репетиційна	95-105	40
Декораційна, що сумісна з студією	60	—
Фойє, шумний вестибюль	85	—
Коридор	80	—
Коридор із середньою інтенсивністю руху	70-75	—
Тихий коридор	65	—
Коридор з м'якими доріжками	55	—
Адміністративні приміщення	65	—
Магазин (мінімаркет)	75	—
Мегамаркет	85	—
Відеопереглядова зала	90	—
Вулиця: а) з інтенсивним рухом	90	—
б) з середньою інтенсивністю руху	80	—
в) тиха	70	—
Двір житлового масиву	75	—
Спортивний майданчик	75	—
Промисловий двір	80	—
Виставковий павільйон	80	—
Аудиторія для практичних занять	75	—
Лекційна аудиторія	80	—
Навчальна лабораторія	75-80	—
Бібліотека, архів, сховище музичних інструментів	50	—
Парк	70	—
Службове (офісне) приміщення	70	—
Приймальна службова кімната	65	—
Житлова кімната	70	—
Готельний номер	65	—
Складське приміщення	50	—
Дахове приміщення	75	—
Підвальне приміщення	50	—



## ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 – Середня власна звукоізоляція деяких огорож та матеріалів

Тип огорожі	Розміри, товщина	Вага, щільність 1 кг/м <sup>2</sup>	Середня власна звукоізоляція, дБ
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 120 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 140 мм	240	47
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 250 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 270 мм	460	53
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 380 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 400 мм	680	56
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 510 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 530 мм	900	59
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 640 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 660 мм	1120	61
Перегородка цегляна	Цеглина завтовшки 770 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 790 мм	1340	63
Перегородка цегляна подвійна	Із повітряним проміжком на спільному фундаменті. Розміри 380+150+510, штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 1060 мм	1400	64
Перегородка цегляна подвійна	Із повітряним проміжком на різних фундаментах. Розміри 380+300+510, штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 1060 мм	1400	75
Перегородка з дошки	Каркас з брусків завтовшки 50 мм. Фанера 2х5 мм. Загальна товщина 60 мм	20	30
Перегородка із збірних щитів, оббитих фанерою	Щит 50 мм. Штукатурка 2х20 мм. Загальна товщина 90 мм	85	40
Перегородка з дощок посилена	Дощки 50 і 25 мм з прокладкою картону. Штукатурка 2х (20-25) мм. Загальна товщина 120 мм	95	41
Перегородка із залізобетону	Залізобетонна стіна завтовшки 80 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 100 мм	250	44
Перегородка із залізобетону	Залізобетонна стіна завтовшки 140 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 160 мм	400	51
Перегородка із залізобетону	Залізобетонна стіна завтовшки 180 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 200 мм	500	52
Перегородка із залізобетону	Залізобетонна стіна завтовшки 280 мм. Штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 300 мм	750	58

Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Підвісна стеля із мінераловатних плит товщиною 50 мм, штукатурка на сітці 20 мм. Розміри 60+100+50+20 мм. Загальна товщина 230 мм.	540	59
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Розміри 50+60 мм. Загальна товщина 110 мм.	310	46
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Підвісна стеля із мінераловатних плит товщиною 50 мм, штукатурка на сітці 20 мм. Розміри 50+60+50+20 мм. Загальна товщина 180 мм.	340	55
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Розміри 60+100 мм. Загальна товщина 160 мм.	500	54
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Розміри 80+220 мм. Загальна товщина 300 мм.	740	55
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Підвісна стеля із мінераловатних плит товщиною 50 мм, штукатурка на сітці 20 мм. Розміри 60+100+50+20 мм. Загальна товщина 230 мм.	540	59
Міжповерхове перекриття	Бетонна стяжка на залізобетонній плиті. Підвісна стеля із мінераловатних плит товщиною 100 мм, штукатурка на сітці 20 мм. Розміри 80+220+100+20 мм. Загальна товщина 420 мм.	820	62
Гіпсобетонна панель	Загальна товщина 95 мм	135	37
Перегородка гіпсобетонна подвійна	Із повітряним проміжком на спільній основі. Розміри 95+100+95, штукатурка 2x10 мм. Загальна товщина 310 мм	270	43
Перегородка гіпсобетонна подвійна	Із повітряним проміжком на спільній основі. Розміри 95+40+95, штукатурка 2x10 мм. Загальна товщина 250 мм	270	46
Деревно-стружкова плита	Загальна товщина 20 мм	12	25
Фанерна панель	Загальна товщина 10 мм	8	23
Перегородка фанерна подвійна	Фанерний лист товщиною 3 мм, проміжок 50 мм, заповнений шлаковатою. Загальна товщина 56 мм	12	29
Перегородка фанерна подвійна	Фанерний лист товщиною 3 мм, проміжок 65 мм, заповнений шлаковатою. Загальна товщина 71 мм	14	34

Сталева панель з ребрами жорсткості 1х1 м	Товщина 4 мм	31,2	28
Сталева панель з ребрами жорсткості 1х1 м	Товщина 8 мм	62,4	32
Тришарова гіпсова панель	3 діафрагмою із армоцементу товщиною 20 мм. Розміри 80+60+80, штукатурка 2х10 мм. Загальна товщина 280 мм	-	54
Двері акустичні	Спеціальна конструкція. Розміри 90х210х60 мм.	-	25
Двері звичайні	Двопанельні з фільонкою із фанери 3 мм, та обв'язуванням товщиною 25 мм	-	10
Двері звичайні	Двопанельні з фільонкою із дощок 25 мм, та обв'язуванням товщиною 45 мм	-	18
Двері звичайні	Двопанельні з фільонкою із дощок 25 мм, обв'язуванням товщиною 45 мм та заклеєна фанерою розміром 90х200 мм	-	22
Двері дубові важкі	Щільно підігнана. Розміри 90х210х60 мм.	-	25
Двері-ворота дубові важкі	Щільно підігнана. Розміри 180х220х60 мм.	-	24
Двері металеві	Герметичні. Обшиті поролоном та штучною шкірою. Розміри 90х200х60 мм.		30
Картон	Пресований, товщина 5 мм	3	16
Картон	Пресований, декілька шарів, товщина 20 мм	12	20
Дошка суцільна	Соснова, товщина 30 мм	19,5	12
Дошка суцільна	Дубова, товщина 45 мм	33,5	27
Залізо	Листове, товщина 2 мм	15,6	33

Таблиця Д.2 – Звукоізоляції від повітряного шуму вікнами в залежності від конструкції

Конструкція вікна	Товщина скла, мм	Товщина повітряного проміжку між склами, мм	Середня звукоізоляція при умові прилягання по периметру, дБ	
			без ущільнювальних прокладок	з ущільнювальними прокладками із пінополіуретану
Вікно з відкритою хвірткою, вузькою щілиною або фрамугою	-	-	10	-
Одинарне вікно	3	-	18	20
	6	-	21	23
Подвійне вікно	3 та 3	57	22	24
	6 та 3	57	26	28

	6 та 4	57	27	29
Роздільно-зближене вікно	3 та 3	90	24	26
	6 та 4	90	28	30
Металопластикові вікна з подвійним склопакетом (однокамерні)	4 - 4	16	24	30
Металопластикові вікна з подвійним склопакетом (однокамерні)	4 - 4	24	25	32
Металопластикові вікна з подвійним склопакетом (однокамерні), заповнення інертним газом (аргон)	4 - 4	16	29	33
Металопластикові вікна з потрійним склопакетом (двокамерні)	4 - 4 - 4	10 - 10	30	36
Металопластикові вікна з потрійним склопакетом із застосуванням тріплекса	9 - 4	1 - 16	39	42
Металопластикові вікна з потрійним склопакетом (двокамерні)	4 - 4 - 4	12 - 16	30	36
Акустичне вікно з потрійним склопакетом	5 - 8 - 6	12 - 16	-	40
Акустичне вікно з потрійним склопакетом, заповнення інертним газом	5 - 8 - 6	12 - 16	-	43
Акустичне вікно з потрійним склопакетом, непаралельними склами	6 - 8 - 6	24 - 16	-	46
Акустичне вікно з потрійним склопакетом, непаралельними склами	6 - 8 - 9	32 - 24	-	49
Акустичне вікно з потрійним склопакетом, непаралельними склами, заповнення аргоном	6 - 8 - 6	24 - 16	-	49
Акустичне вікно з потрійним склопакетом, непаралельними склами, триплексом заповнення аргоном	8 - 9 - 6	1 - 32 - 24	-	56

Таблиця Д.3 – Підвищення звукоізоляції від повітряного шуму стіною при застосуванні додаткових плит з віднесенням від стіни

№ п.п	Конструкція плити	Підвищення звукоізоляції від повітряного шуму, дБ	
		облицювання з однієї сторони	облицювання з двох сторони
1	Гіпсокартонні листи, азбоцемент, деревно-стружкові плити, фанера 15...20 мм із заповненням повітряного проміжку звукопоглинальним матеріалом (мінераловатні плити, скловолокно тощо)	4	6
2	Гіпсокартонні листи, азбоцемент, деревно-стружкові плити, фанера 15...20 мм без заповнення повітряного проміжку звукопоглинальним матеріалом	2	4
3	Деревно-волокниста плита, фанера до 15 мм із заповненням повітряного проміжку звукопоглинальним матеріалом (мінераловатні плити, скловолокно тощо)	2	5
4	Деревно-волокниста плита, фанера до 15 мм без заповнення повітряного проміжку звукопоглинальним матеріалом	0	1
5	Пінопласт, товщиною 50 мм без віднесення від стіни, наклеєний безпосередньо на стіну	2	4